

В. А. БОЙКО
Н. Ф. КРЕМЕНЧУЦКИЙ

**ОСНОВЫ
ТЕОРИИ
РАСЧЕТА
ВЕНТИЛЯЦИИ
ШАХТ**

В. А. БОЙКО, Н. Ф. КРЕМЕНЧУЦКИЙ

ОСНОВЫ
ТЕОРИИ РАСЧЕТА
ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ



МОСКВА «НЕДРА» 1978

Бойко В. А., Кривенчук Н. Ф. Основы теории расчета вентиляционных шахт. М., «Недра», 1978. 280 с.

В книге рассмотрены вопросы оптимизации шахтных вентиляционных систем и их элементов при регулировании расхода воздуха в вентиляционных сетях, направления совершенствования существующих и создания новых методов расчета регулирования воздуха и аэродинамических параметров средств регулирования, основы расчета вентиляционных схем и оптимизации их применения, оптимизации ряда параметров при объединении вентиляционных сетей шахт в общую систему, методы решения внутрисетевых задач, базирующиеся на предварительном упрощении вентиляционных соединений (включая диагональные и комбинированные), а также методы расчета вентиляционных систем местного проветривания.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников горнодобывающей промышленности, занимающихся вопросами расчета и управления вентиляцией шахт, и может быть полезной студентам горных вузов для углубленного изучения вопросов расчета вентиляционных сетей шахт.

Табл. 33, ил. 70, список лит. — 83 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Важным этапом технического прогресса является расширение применения экономико-математических методов для управления производством. Одним из основных путей улучшения санитарно-гигиенических условий и повышения безопасности труда в шахтах является улучшение вентиляции шахт. Мероприятия по улучшению вентиляции будут эффективны только при расчетном обосновании принимаемых решений.

Значительный удельный вес вентиляции в сумме общешахтных затрат, ее влияние на затраты по проведению и поддержанию горных выработок определяют большую роль вентиляции в комплексе технико-экономических мероприятий совершенствования производства.

При существующих методах оптимизации вентиляционных сетей принимается естественное распределение воздуха по направлениям. Оптимизация при регулировании распределения воздуха в сетях имеет ряд отличительных особенностей, и учет этих особенностей вносит существенное уточнение в решение задач. Решение задач оптимизации сетей с регулируемым распределением воздуха вызывает необходимость совершенствования методов расчета параметров регулирования распределения воздуха, в том числе с использованием методов математического программирования.

Совершенствование методов решения оптимальных задач имеет большое значение для конструирования новых вентиляционных сетей и систем.

В последние годы для улучшения вентиляции шахт широко используются скважины большого диаметра. Однако в ряде случаев пробуренные на выработки вентиляционных сетей скважины не дают существенного улучшения вентиляции. Основной причиной такого положения является бурение скважин без детального расчетного обоснования. Совершенно отсутствуют методы расчета вентиляционных скважин, используемых для улучшения аэродинамического качества вентиляционных сетей.

Основные принципиальные положения расчета вентиляционных скважин могут быть использованы при расчете параметров объединения двух шахт в одну вентиляционную систему. Предполагается дальнейшее повышение концентрации производства путем объединения смежных шахт. При этом часто возникает вопрос целесообразности объединения вентиляционных систем. Такое объединение может быть обоснованным при возможности повышения интенсивности проветривания одной из шахт за счет

имеющихся резервов вентиляции другой шахты. Наибольший эффект можно получить при наличии методов расчета и оптимизации объединенных вентиляционных систем.

Разработка научно обоснованных методов расчета вентиляционных схем и объединенных вентиляционных систем дает возможность конструировать новые технически совершенные вентиляционные сети и наметить пути подготовки существующих вентиляционных систем для повышения надежности оперативного управления вентиляцией шахты как при нормальном, так и при аварийном режиме.

В настоящее время большинство вентиляционных систем крупных шахт очень сложны, и предварительное упрощение их является основным путем уменьшения трудоемкости расчетов. Существующие методы упрощения вентиляционных сетей не учитывают важность последних в вентиляционную систему. Кроме того, отсутствуют методы локального решения внутрисетевых задач с учетом работы вентиляторов на сеть, метод аналитического определения перепада давления, создаваемого вентилятором в отдельной выработке или группе выработок сети. Без определения этого перепада нельзя рассчитать, например, параметры вредного влияния тепловой депрессии при возникновении пожара в наклонных выработках с нисходящим движением воздуха, а значит, принять эффективные меры по предупреждению самопроизвольного опрокидывания вентиляционной струи.

При упрощении вентиляционных систем возникает необходимость преобразования сетей для исключения диагоналей. Существующие методы преобразования диагональных соединений выработок, в частности метод перехода с треугольника на звезду, не дают результатов нужной точности, так как они базируются на упрощающих задачу допущениях. Требуют более детальной разработки методы преобразования и расчета комбинированных соединений с внутренними выработками в виде усложненных дополнительных разветвлениями диагоналей.

Недостаточно разработаны методы определения максимально возможной длины трубопровода, при которой заданный вентилятор подает в забой необходимое количество воздуха. Нет способа аналитического определения параметров совместной работы вентиляторов при рассредоточенной установке их на трубопроводе.

Новым является вопрос расчетов аэродинамических параметров исполнительных органов регуляторов расхода воздуха для дистанционного и автоматического регулирования расхода воздуха.

В написании гл. 5 принимал участие аспирант И. М. Капшук в написании гл. 9 принимали участие аспиранты В. Д. Хомасурдзе и А. А. Литвиненко.

Авторы приносят глубокую благодарность проф., д-ру техн. наук Л. А. Пучкову за большой труд по рецензированию рукописи и ценные замечания по работе.

1. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

1.1. УЧЕТ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Полный расход электроэнергии на вентиляцию шахты определяется суммой расходов на продвижение воздушной струи по всем выработкам шахты.

Расход энергии на продвижение воздушной струи по единичной выработке

$$E_i = \frac{Q_i h_i}{102\eta} 24 \cdot 365 t, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1.1)$$

где Q_i — расход воздуха по i -й выработке, $\text{м}^3/\text{с}$;

h_i — депрессия выработки, $\text{кгс}/\text{м}^2$;

η — к. п. д. вентиляторной установки;

t — срок службы выработки, лет.

С учетом изменения величины расхода воздуха в течение времени t расход электроэнергии будет

$$E_i = \frac{R_i M(Q_i)^3}{102\eta} 24 \cdot 365 t, \quad (1.2)$$

где R_i — аэродинамическое сопротивление i -й выработки, $\text{кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$;

$M(Q_i)$ — математическое ожидание расхода воздуха по i -й выработке, $\text{м}^3/\text{с}$.

Однако, если речь идет об изменении расхода электроэнергии, связанном с изменением сопротивлений выработок (за счет изменения их площади сечений, вида крепи или длины), использовать формулу (1.1) для выработок, входящих в разветвленную сеть, где распределение воздуха регулируется, нельзя.

Для такой сети уменьшать аэродинамическое сопротивление с целью улучшения аэродинамического качества сети целесообразно только для выработок, входящих в направление максимальной депрессии. На выработках этого направления отсутствуют регуляторы. Изменение сопротивления выработок направления с регуляторами сопровождается (для сохранения заданного распределения воздуха) изменением сопротивления регулятора. Например, уменьшение сопротивления выработки такого направления сопровождается увеличением сопротивления соответствующей

этого регулятора. Величина уменьшения депрессии выработки макс. величине увеличения депрессии регулятора, поэтому уменьшение депрессии выработки направлення, которое включает регулятор. Аналогично

Следует учесть уменьшение сопротивления отдельных выработок при уменьшении максимальной депрессии вызывает перераспределение воздуха. Для того чтобы распределение воздуха оставалось неизменным, кроме уменьшения сопротивления выработок этого направления требует соответствующего изменения сопротивлений регулятора как других направлений. При этом уменьшение депрессии одной из выработок направлення максимальной депрессии на некоторую величину должно сопровождаться уменьшением депрессий всех регуляторов на такую же величину.

Расход электроэнергии главным вентилятором при регулировании распределения воздуха определяется

$$E_{\text{вент}} = \frac{Q \cdot 24 \cdot 365 T_{\text{вент}}}{102 \eta} \sum_{i=1}^m h_i, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (1.3)$$

где Q — производительность вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$;

$T_{\text{вент}}$ — время работы вентилятора, лет;

h_i — депрессия i -й выработки, входящей в направление максимальной депрессии, $\text{кгс}/\text{м}^2$;

m — число выработок в составе направления максимальной депрессии.

С учетом изменения величины производительности вентилятора и расхода воздуха по i -й выработке формула (1.3) будет иметь вид

$$E_{\text{вент}} = \frac{M \cdot 0,125 \cdot 365 T_{\text{вент}}}{102 \eta} \sum_{i=1}^m R_i [M(Q_i)]^2. \quad (1.4)$$

В формулах, приведенных выше, расходы воздуха могут быть заменены математическими ожиданиями расходов воздуха.

Расход электроэнергии главного вентилятора, отнесенный к i -й выработке, входящей в направление максимальной депрессии, запишется

$$E_i = \frac{Q h_i}{102 \eta} 24 \cdot 365 T. \quad (1.5)$$

Следовательно, общий расход электроэнергии можно разложить на составные части, которые относятся к отдельной выработке направления максимальной депрессии. Это определяет основное отличие формулы для определения расхода электроэнергии на продувание воздушной струи по выработке при регулировании распределения воздуха от формулы при естественном распределении воздуха.

Используя описанный метод учета расхода электроэнергии, можно произвести экономическое сравнение двух видов крепки выработки.

Срок службы выработки струн максимальной депрессии, при котором экономически выгодно применение второго вида крепи, определяется неравенством

$$T > \frac{K_2 - K_1}{r_1 - r_2 + \frac{K_2 - K_1}{q} \left(\frac{a_1 P_1}{S_1} - \frac{a_2 P_2}{S_2} \right)} \quad (1.6)$$

где K_1, K_2, r_1, r_2 — соответственно затраты на проведение (с учетом эффективности капиталовложения) и поддержание 1 м выработки в год при креплении первым и вторым видами крепи, руб.;

Q_0 — расход воздуха по выработке, м³/с,
 a_1, a_2, P_1, P_2 — соответственно коэффициенты аэродинамического сопротивления, периметры и площади поперечного сечения выработки для двух видов крепи

Из неравенства (1.6) можно получить условие, определяющее выгодность применения одного из видов крепи, если срок службы выработки задан.

1.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ С РЕГУЛИРУЕМЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ВОЗДУХА

Пусть m_1, m_2, \dots, m_q — число выработок, входящих в 1, 2, ..., q направления максимальной депрессии. Тогда оптимальные сечения рассчитываются для $n < \sum_{j=1}^q m_j$ выработок (q — число направлений максимальной депрессии за срок службы шахты), ибо одна и та же выработка может входить в несколько направлений максимальной депрессии, смещенных по времени.

Обозначим t_j — срок службы выработки (лет), t_{ij} — время нахождения этой выработки в составе j -го направления максимальной депрессии (лет). Тогда $t_j = \sum_{i=1}^q t_{ij}$ (q — число направлений максимальной депрессии, в которые входит i -я выработка). Обозначим t_{ijk} — длительность k -го периода сохранения постоянного режима проветривания i -й выработки, входящей в j -е направление максимальной депрессии (лет). Тогда $t_{ij} = \sum_{k=1}^{p_{ij}} t_{ijk}$

(p_{ij} — число отрезков времени с постоянным режимом проветривания i -й выработки в j -м направлении максимальной депрессии).

Если выработка за срок службы шахты ни разу не войдет в состав направления максимальной депрессии, то сечение этой выработки должно приниматься без расчета — минимальным по габаритам транспортных средств с проверкой по максимальной допустимой скорости движения воздуха согласно ПБ.

Изменение режима движения воздуха по выработкам шахты учитывается путем выделения периодов с постоянным режимом движения воздуха и суммирования расходов электроэнергии по периодам.

Суммарные затраты на проведение и поддержание выработок, которые будут входить в направлении максимальной депрессии, а также на электроэнергию для проветривания шахты, могут быть выражены как функция поперечных сечений этих выработок

$$I(S_1, S_2, \dots, S_n) = \sum_{i=1}^n \left[(a_i + b_i S_i) l_i + d_i S_i l_i \tau + \alpha_i \frac{C_i l_i}{S_i^2} \tau \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{k=1}^{p_{ij}} \left(Q_{ijk}^2 l_{ijk} \frac{Q_{ijk}}{\eta_{ijk}} \right) \right], \quad (1.7)$$

где S_i — площадь поперечного сечения i -й выработки, м^2 ;

$$\tau = \frac{24 \cdot 365 \gamma}{102};$$

γ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии с учетом двуступенчатого тарифа, руб.;

a_i, b_i — коэффициенты в формуле для определения стоимости проведения 1 м i -й выработки с учетом эффективности капиталовложений;

$$k_i = a_i + b_i S_i;$$

d_i — коэффициент в формуле для определения стоимости поддержания 1 м i -й выработки в год;

$$r_i = d_i S_i;$$

α_i — коэффициент аэродинамического сопротивления i -й выработки, $\text{кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$;

l_i — длина i -й выработки, м. Если длина выработки изменяется, то l_i — средняя длина выработки;

Q_{ijk} — расход воздуха по i -й выработке во время вхождения в j -е направление максимальной депрессии в течение k -го периода с постоянным режимом движения воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_{jk} — производительность вентиляторной установки во время j -го направления максимальной депрессии и k -го периода с постоянным режимом движения воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

η_{ijk} — к. п. д. вентиляторной установки в течение того же периода времени;

$$C_i = \frac{P_i}{\sqrt{S_i}} \quad (\text{где } P_i \text{ — периметр } i\text{-й выработки}).$$

Функция $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в испытываемой точке $(x_{1, \text{оп}}, x_{2, \text{оп}}, \dots, x_{n, \text{оп}})$ будет иметь собственный минимум, если второй дифференциал, т. е. квадратичная форма

$$\sum_{i, k=1}^n a_{ik} \Delta x_i \Delta x_k \quad (1.11)$$

где

$$\Delta x_i = x_i - x_{i, \text{оп}}$$

со значениями коэффициентов

$$f_{i, i, k}(x_{1, \text{оп}}, x_{2, \text{оп}}, \dots, x_{n, \text{оп}}) = a_{ik}, \quad (1.12)$$

$$i, k = 1, 2, \dots, n$$

оказывается определенной положительной формой.

Для того чтобы форма (1.11) была определенной и положительной, согласно Сильвестру, необходимо и достаточно, чтобы все главные миноры матрицы

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

были строго положительны.

В условиях нашей задачи критерий Сильвестра требует соблюдения цепи неравенств

$$\frac{0.75A_1}{S_{1, \text{оп}}^{4,1}} > 0, \quad \begin{vmatrix} \frac{0.75A_1}{S_{1, \text{оп}}^{4,1}} & 0 \\ 0 & \frac{0.75A_2}{S_{2, \text{оп}}^{4,2}} \end{vmatrix} > 0, \quad \dots$$

$$\begin{vmatrix} \frac{0.75A_1}{S_{1, \text{оп}}^{4,1}} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \frac{0.75A_2}{S_{2, \text{оп}}^{4,2}} & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \frac{0.75A_n}{S_{n, \text{оп}}^{4,n}} \end{vmatrix} > 0, \quad (1.14)$$

$$A_i = \alpha_i C_i l_i \tau \sum_{j=1}^{q_i} \sum_{k=1}^{p_{ij}} \left(Q_{ijk} l_{i,j,k} \frac{Q_{ijk}}{\pi_{i,j,k}} \right). \quad (1.15)$$

Неравенства (1.14) всегда соблюдаются, так как все ненулевые элементы определителей положительны и расположены только на

главной диагонали. Определитель диагональной матрицы равен произведению диагональных элементов.

Итак, сечения горных выработок, подсчитанные по формуле (1.10), удовлетворяют необходимым и достаточным условиям существования минимума функции расходов, т. е. являются оптимальными.

На рис. 1.1 приведен график изменения оптимальных сечений горных выработок (в условиях шахт Западного Донбасса) в зависимости от количества воздуха, проходящего по выработке и через вентилятор, при следующих значениях параметров: $\alpha = 0,0015$, $C = 3,8$, $\tau = 1,288$, $l = 10$, $\eta = 0,5$, $b = 17,944$, $d = 0,55$.

Отдельные горные выработки могут иметь сечения, отличные от оптимальных. Если сечение выработки, определенное по формуле (1.10), больше максимально возможного по условиям проходческой техники или другим причинам, его необходимо уменьшить до этой величины. Если рассчитанное сечение выработки меньше необходимого по габаритам транспортных средств, его необходимо увеличить до требуемой величины.

Рассчитав оптимальные сечения по формулам (1.10), легко найти оптимальную депрессию шахты для любого периода существования шахтной сети

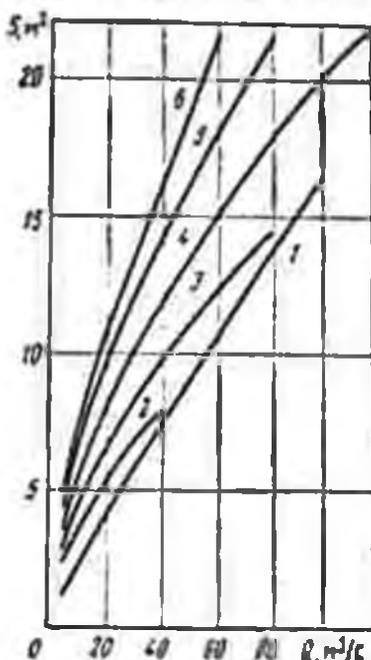


Рис. 1.1. График зависимости оптимальных сечений горных выработок в зависимости от расхода воздуха по выработке:

1 — оптимальные сечения при расходе воздуха по выработке, равном производительности вентилятора; 2 — 6 — оптимальные сечения соответственно при производительности вентилятора 50, 100, 100, 100 и 200 м³/с.

$$h_{j,k,оп} = \sum_{i=1}^{m_j} \alpha_i \frac{C_i l_i}{S_{i,оп}^{3,3}} Q_{j,k}^2 + h_{з,j,k} + \sum_{l=1}^r h_{мз,l,j,k} \text{ кгс/м}^2, \quad (1.16)$$

где $h_{j,k,оп}$ — оптимальная депрессия шахты при j -й струе максимальной депрессии и k -м режиме движения воздуха по выработкам шахты, кгс/м²;

m_j — число выработок, входящих в j -ю струю максимальной депрессии (кроме лавы);

$S_{i,оп}$ — оптимальное сечение i -й выработки, подсчитанное по формуле (1.10), м²;

$\eta_{л,j,k}$ — депрессия лавы, входящей в j -ю струю максимальной депрессии во время k -го режима движения воздуха, кгс/м²;

$\sum_{i=1}^r h_{ac, j, i}$ — суммарная депрессия местных сопротивлений, входящих в j -ю струю максимальной депрессии во время k -го режима движения воздуха (r — число местных сопротивлений, входящих в j -ю струю).

Как видно из рис. 1.1, оптимальные сечения выработок, по крайней мере, не меньше сечений аналогичных выработок действующих шахт, поэтому оптимальная депрессия не превосходит фактические депрессии шахт.

1.3 УЧЕТ ЗАТРАТ НА ВЕНТИЛЯЦИЮ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫЕМОЧНЫХ ПОЛЕЙ

Затраты на электроэнергию, расходуемую для продвижения воздуха по выработке, входящей в направление максимальной депрессии, определяются по формуле (1.5).

Обозначим затраты электроэнергии (в рублях), расходуемой за 1 год на продвижение воздушной струи по выработке длиной l м при прохождении по ней $1 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха, через

$$r_i = \frac{Q}{10^3 \eta} \alpha_i \frac{P_i l_i}{57} 24 \cdot 365 \gamma, \quad (1.17)$$

где l_i — длина i -й выработки, м, тогда затраты на электроэнергию для продвижения воздуха по выработке можно записать $c_{1i} l_i Q_i^2$.

Рассмотрим обособленное проветривание выемочного участка при возвратноточной схеме и расположении бремсберга между точкой поступления воздуха на пласт и линией очистных забоев. Выбор оптимальных размеров выемочных полей зависит от затрат на электроэнергию, расходуемую для продвижения воздуха по этажным откаточному и вентиляционному штрекам до разветвления и после соединения выработок, а также по подэтажным или этажным штрекам между этими точками, просуммированных для крыла шахты.

Затраты на электроэнергию для продвижения воздуха по этажному откаточному штреку до разветвления, равные сумме, каждое слагаемое которой относится к отработке одного выемочного поля, от 2-го до n -го,

$$l_1(x) = c_{0, n} \frac{x^2}{L} Q_0^2 + 2c_{0, n} \frac{x^2}{L} Q_0^2 + \dots + (n-1) \times \\ \times c_{0, n} \frac{x^2}{L} Q_0^2 = \frac{c_{0, n} S_0^2 Q_0^2}{2L} - \frac{c_{0, n} S_{n, r} Q_0^2}{2L}, \quad (1.18)$$

По аналогии для этажного вентиляционного штрека затраты на продвижение воздуха за точкой соединения будут

$$f_2(x) = \frac{c_{o, \text{ш}} S_{\text{ш}}^2 Q_2^2}{2L} - \frac{c_{в, \text{ш}} S_{\text{ш}} x Q_2^2}{2L}, \quad (1.19)$$

где x — расстояние между брезбергами, м;
 $c_{o, \text{ш}}$ и $c_{в, \text{ш}}$ — то же, что c , в формуле (1.17) соответственно для откаточного и вентиляционного этажных штреков;
 L — подвигание очистного забоя, м/год;
 n — число выемочных полей в крыле этажа;
 $S_{\text{ш}}$ — длина крыла шахтного поля, м;
 Q_2 — расход воздуха по этажным штрекам до разветвления и после соединения воздушной струи, м³/с.

Затраты на электроэнергию для продвижения воздуха от точки разветвления до точки соединения струи на этажных штреках можно подсчитать по любому направлению (если расход воздуха в пределах участка не регулируется) или по направлению максимальной депрессии данного соединения выработок при регулировании распределения воздуха. Они состоят из суммы затрат на продвижение воздуха по наклонной выработке, лаве и штрекам. Затраты на электроэнергию для продвижения воздуха по откаточному штреку лавы направления максимальной депрессии для крыла этажа выразятся

$$f_2(x) = c_{o, \text{л}} \frac{S_{\text{л}} x}{2L} \cdot Q_2^2. \quad (1.20)$$

Аналогично для вентиляционного штрека затраты на электроэнергию будут

$$f_1(x) = c_{в, \text{л}} \frac{S_{\text{л}} x}{2L} \cdot Q_2^2. \quad (1.21)$$

где $c_{o, \text{л}}$ и $c_{в, \text{л}}$ — то же, что c , в формуле (1.17) для откаточного и вентиляционного штреков направления максимальной депрессии;

Q_2 — расход воздуха по этим выработкам, м³/с.

Поправка в существующие формулы для определения оптимальных размеров выемочных полей, учитывающая затраты на электроэнергию, должна вноситься как дополнительное слагаемое знаменателя подкоренного выражения этих формул. Для рассматриваемого случая она будет

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{Q_2^2}{2Lh\rho_{\text{в}}} (c_{o, \text{л}} + c_{в, \text{л}}) - \frac{Q_2^2}{2Lh\rho_{\text{в}}} (c_{o, \text{ш}} + c_{в, \text{ш}}), \quad (1.22)$$

$$I(x) = \frac{1}{\lambda \rho c_n} \{I_1(x) + I_2(x) + I_3(x) + I_4(x)\};$$

h — наклонная высота этажа, м;

ρ — производительность 1 м³ пласта, т/м³;

c_n — коэффициент извлечения угля.

Аналогично получали поправки при другом расположении буржбурга [27], при группировании пластов [25], а также при определении размеров панелей по простиранию.

1.4. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫЕМОЧНЫХ ПОЛЕЙ И ОПТИМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Рассмотрим случай группирования пластов.

При регулировании распределения воздуха в сети решение задачи производится в случае расположения выработок выемочных участков на направлении максимальной депрессии. Учитываются затраты, зависящие от размеров выемочного поля по простиранию и площади поперечного сечения штреков пласта направления максимальной депрессии группированной свиты. После отнесения к длине выемочного поля по простиранию они записуются

$$\begin{aligned} I(x, S_1, S_2) = & \frac{K+K'}{x} + \frac{x}{2L} \sum r_i + \frac{x}{2L} \sum r'_i + \\ & + \sum_{i=1}^2 (a_i + b_i S_i) + \frac{x}{2L} \sum_{i=1}^2 A_i S_i + \frac{x}{2L} \sum_{i=1}^2 \frac{Q_i^2 F_i}{S_i^3} + \\ & + h \sum \rho c_n q_i h_{i,n}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

где S_1 и S_2 — площади поперечного сечения откаточного и вентиляционного штреков пласта направления максимальной депрессии, м²;

K и K' — полные затраты на проведение промежуточных хвостяков на откаточном и вентиляционном горизонтах с учетом эффективности капиталовложений, руб.;

Σr_i и $\Sigma r'_i$ — суммарные стоимости поддержания 1 м погашенных откаточных и вентиляционных штреков группированных пластов (за исключением пласта направления максимальной депрессии) в год, руб.;

A_1 и A_2 — стоимости поддержания 1 м³ откачного и вентиляционного штреков пласта направления максимальной депрессии в год, руб.;

q — стоимость 1 т·м транспорта по штреку, руб.;

k_n — $\left\{ \begin{array}{l} 1 — \text{при группировании на передний промежуточный квершлаг;} \\ 0 — \text{при группировании на задний промежуточный квершлаг;} \end{array} \right.$

Q_i — расход воздуха по i -й выработке, м³/с;

$$F_i = \frac{Q}{102\eta} \alpha_i c_i 24 \cdot 365 \gamma \quad (1.24)$$

Необходимым условием существования экстремума функции (1.23) будет удовлетворение системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= -\frac{2L(K+K')}{x^3} + \sum r_c + \sum r'_c + \sum_{i=1}^2 A_i S_i + \\ &+ \sum_{i=1}^2 \frac{Q_i^2 F_i}{S_i^{2.5}} + 2Lh c_n q k_n \sum p = 0; \\ \frac{\partial f}{\partial x_i} &= 2Lb_i + A_i x - 2.5 \frac{Q_i^2 F_i}{S_i^{3.5}} x = 0, \\ &i = 1, 2. \end{aligned} \right\} (1.25)$$

Совместное решение системы уравнений (1.25) определяет стационарную точку $M_{opt}(x_{opt}, S_{1, opt}, S_{2, opt})$.

Систему уравнений (1.25) можно свести к одному алгебраическому уравнению. Для этого из двух последних уравнений системы определяется

$$S_{i, opt} = \left(\frac{2.5 Q_i^2 F_i}{2Lb_i + A_i} \right)^{0.286}, \quad i = 1, 2. \quad (1.26)$$

Подставляя значения S_1 и S_2 из (1.26) в первое уравнение системы (1.25), получим

$$\begin{aligned} -\frac{2L(K+K')}{x^3} + \sum_{i=1}^2 \frac{Q_i^2 F_i}{\left(\frac{2.5 Q_i^2 F_i}{2Lb_i + A_i} \right)^{0.714}} + \sum_{i=1}^2 A_i \left(\frac{2.5 Q_i^2 F_i}{2Lb_i + A_i} \right)^{0.286} + \\ + \sum r_c + \sum r'_c + 2Lh c_n q k_n \sum p = 0 \end{aligned} \quad (1.27)$$

Уравнение (1.27) может быть приближенно решено методом итерации. С этой целью уравнение (1.27) записывается в виде

$$x_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{2L(K + K')}{\sum_{i=1}^2 \frac{Q_i^2 F_i + \frac{2.5Q_i^2 F_i A_i}{x} + A_i}{\left(\frac{2.5Q_i^2 F_i}{\frac{2Lb_i}{x} + A_i}\right)^{0.75}} + \sum r_k + \sum r'_k + 2Lhc_n q k_n \sum p}} \quad (1.28)$$

Проверка показывает, что для нашей задачи $|f'(x)| < 1$ соблюдается, и процесс итерации сходится к корню уравнения (1.27).

После нахождения значения $x_{\text{ст}}$ по (1.26) определяются S_1 и S_2 . Определив координаты стационарной точки $M_{\text{ст}}(x_{\text{ст}}, S_1, S_2)$, необходимо проверить наличие достаточных условий существования минимума функции в этой точке.

Согласно критерию Сильвестра, минимум функции (1.23) в стационарной точке существует, если все угловые миноры матрицы

$$\begin{vmatrix} \frac{2L(K + K')}{x_{\text{ст}}^2} & A_1 - \frac{2.5Q_1^2 F_1}{S_{1,\text{ст}}^{2.5}} & A_2 - \frac{2.5Q_2^2 F_2}{S_{2,\text{ст}}^{2.5}} \\ A_1 - \frac{2.5Q_1^2 F_1}{S_{1,\text{ст}}^{2.5}} & \frac{8.75Q_1^2 F_1}{S_{1,\text{ст}}^{4.5}} x_{\text{ст}} & 0 \\ A_2 - \frac{2.5Q_2^2 F_2}{S_{2,\text{ст}}^{2.5}} & 0 & \frac{8.75Q_2^2 F_2}{S_{2,\text{ст}}^{4.5}} x_{\text{ст}} \end{vmatrix} \quad (1.29)$$

строго положительны.

При разработке пластов, склонных к самовозгоранию, расположение регуляторов на штреках может способствовать возникновению внезапных пожаров. В этом случае должны определяться сетчатая штреков склонного к самовозгоранию группировочного участка при сохранении равенства депрессий направлений (по мере подвигания очистных забоев).

Учитываемые расходы для i -го направления на 1 м будут

$$I(S_{ki}) = \sum_{k=1}^2 (a_{ki} + b_{ki} S_{ki}) + \sum_{k=1}^2 A_{ki} S_{ki} \frac{x_{\text{ст}}}{2L} \quad (1.30)$$

Уравнение связи уравнивает удельные депрессии штреков направления максимальной депрессии и данного направления

$$\sum_{k=1}^2 \alpha_{ki} \frac{c_{ki}}{S_{ki}^{2,5}} Q_{ki}^2 = \sum h_{0i} \quad (1.31)$$

где $\sum h_{0i}$ — суммарная удельная депрессия штреков пласта направления максимальной депрессии, кгс/м².

Найдем относительный минимум функции (1.30) при наличии уравнения связи (1.31). Используем метод неопределенных множителей Лагранжа.

Введем вспомогательную функцию

$$F = \sum_{k=1}^2 b_{ki} S_{ki} + \sum_{k=1}^2 B_{ki} S_{ki} + \lambda \sum_{k=1}^2 \frac{G_{ki}}{S_{ki}^{2,5}}, \quad (1.32)$$

где

$$B_{ki} = \frac{\kappa_{0i}}{2L} A_{ki}; \quad G_{ki} = \alpha_{ki} c_{ki} Q_{ki}^2.$$

Из условия (1.32) имеем:

$$\frac{\partial F}{\partial S_{ki}} = b_{ki} + B_{ki} - \frac{2,5\lambda G_{ki}}{S_{ki}^{2,5}} = 0. \quad (1.33)$$

$$k = 1, 2.$$

Из системы уравнений (1.33) и уравнения связи (1.31) определяются $S_{1i, \text{оп.}}$, $S_{2i, \text{оп.}}$, λ .

Из второго уравнения системы (1.33)

$$\lambda = \frac{(b_{2i} + B_{2i}) S_{2i}^{2,5}}{2,5G_{2i}}. \quad (1.34)$$

Из уравнения связи (1.31)

$$S_{2i, \text{оп.}} = \left(\frac{G_{2i}}{\sum h_{0i} - \frac{G_{1i}}{S_{1i}^{2,5}}} \right)^{0,4}, \quad (1.35)$$

тогда

$$\lambda = \frac{(b_{2i} + B_{2i}) \left(\frac{G_{2i}}{\sum h_{0i} - \frac{G_{1i}}{S_{1i}^{2,5}}} \right)^{1,4}}{2,5G_{2i}}$$

Из первого уравнения системы (1.33)

$$S_{1i, \text{оп}} = \left[\frac{(b_{2i} + B_{1i}) \left(\frac{G_{2i}}{\sum h_i - \frac{G_{1i}}{S_{1i}^{2,5}}} \right)^{1,4} G_{1i}}{G_{1i} (b_{1i} + B_{1i})} \right]^{0,248} \quad (1.37)$$

$S_{1i, \text{оп}}$ из (1.37) можно определить методом итераций (обычно процесс итерации сходится), после чего $S_{2i, \text{оп}}$ определяется по формуле (1.35).

Уравнивание депрессий указанных направлений в начальный период должно производиться за счет опережающей отработки пластов. В дальнейшем [при рассчитанных сечениях штреков по формулам (1.37) и (1.35) и равных подвиганиях очистных забоев] в течение отработки выемочного поля сохраняется равенство депрессий направлений.

Постановка задачи совместного определения оптимальных размеров выемочного поля по простиранию и оптимальных площадей сечений выработок может быть расширена за счет включения групповых откаточного и вентиляционного штреков.

В дальнейшем примем индексы: 3 — групповой откаточный штрек, 4 — групповой вентиляционный штрек.

Совместное определение оптимальных размеров выемочного поля по простиранию $x_{\text{оп}}$ и оптимальных сечений выработок $S_{3, \text{оп}}$, $S_{4, \text{оп}}$, $S_{2, \text{оп}}$, $S_{1, \text{оп}}$ рассматривается при группировании пластов на задний промежуточный квершлаг.

Затраты на проведение и поддержание выработок, а также на электроэнергию для продвижения воздуха по выработкам в пределах крыла этажа, отнесенные к длине крыла, будут

$$\begin{aligned} f(x, S_1, S_2, S_3, S_4) = & \frac{K + K'}{x} + \frac{x}{2L} \sum_{i=1}^n (r_a + r'_a)_i + \\ & + \sum_{i=1}^4 b_i S_i + \frac{x}{2L} \sum_{i=1}^2 A_i S_i + \frac{S_2 - x}{2L} \sum_{j=3}^4 A_j S_j + \\ & + \frac{x}{2L} \sum_{i=1}^2 \frac{Q_i^2 F_i}{S_i^{2,5}} + \frac{S_2 - x}{2L} \sum_{j=3}^4 \frac{Q_j^2 F_j}{S_j^2}, \end{aligned} \quad (1.38)$$

где n — число погашаемых штреков.

Необходимым условием существования экстремума функции (1.38) будет удовлетворение системы уравнений

$$\frac{\partial f}{\partial x} = -\frac{2L(K + K')}{x^2} + \sum_{i=1}^n (r_a + r'_a)_i + \sum_{i=1}^2 A_i S_i -$$

$$-\sum_{l=1}^4 A_l S_l + \sum_{l=1}^2 \frac{Q_l^2 F_l}{S_l^{2.5}} - \sum_{l=3}^4 \frac{Q_l^2 F_l}{S_l^{2.5}} = 0; \quad (1.39)$$

$$\frac{\partial f}{\partial S_l} = 2Lb_l + A_l x - 2.5 \frac{Q_l^2 F_l}{S_l^{3.5}} x = 0; \quad l = 1, 2;$$

$$\frac{\partial f}{\partial S_l} = 2Lb_l + A_l (S_k - x) - 2.5 \frac{Q_l^2 F_l}{S_l^{3.5}} (S_k - x) = 0; \quad l = 3, 4.$$

Совместное решение системы уравнений (1.39) определяет стационарную точку.

Достаточным условием существования минимума функции (1.38) в стационарной точке, согласно критерию Сильвестра, является положительность всех угловых миноров матрицы

$$\begin{pmatrix} \frac{4L(K+K')}{x_{\text{оп}}} & A_1 - \frac{2.5Q_1^2 F_1}{S_{1,\text{оп}}^{2.5}} & A_2 - \frac{Q_2^2 F_2}{S_{2,\text{оп}}^{2.5}} & 0 & 0 & 0 \\ A_1 - \frac{2.5Q_1^2 F_1}{S_{1,\text{оп}}^{2.5}} & 8.75 \frac{Q_1^2 F_1}{S_{1,\text{оп}}^{4.5}} x_{\text{оп}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 - \frac{2.5Q_2^2 F_2}{S_{2,\text{оп}}^{2.5}} & 0 & 8.75 \frac{Q_2^2 F_2}{S_{2,\text{оп}}^{4.5}} x_{\text{оп}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2.5Q_3^2 F_3}{S_{3,\text{оп}}^{2.5}} - A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2.5Q_4^2 F_4}{S_{4,\text{оп}}^{2.5}} - A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2.5Q_3^2 F_3}{S_{3,\text{оп}}^{2.5}} - A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{8.75Q_3^2 F_3}{S_{3,\text{оп}}^{4.5}} (S_k - x_{\text{оп}}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{8.75Q_4^2 F_4}{S_{4,\text{оп}}^{4.5}} (S_k - x_{\text{оп}}) & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.40)$$

Систему уравнений (1.39) можно свести к одному уравнению. Для этого из четырех последних уравнений этой системы значения S_1 , S_2 , S_3 и S_4 выражаются через x :

$$S_i = \left(\frac{2,5Q_i^2 F_i}{\frac{2Lb_i}{x} + A_i} \right)^{0,296}; \quad i = 1, 2; \quad (1.41)$$

$$S_j = \left(\frac{2,5Q_j^2 F_j}{\frac{2Lb_j}{S_k - x} + A_j} \right)^{0,296}; \quad j = 3, 4. \quad (1.42)$$

Значения S_1 , S_2 , S_3 и S_4 подставляются в первое уравнение системы (1.39). Тогда уравнение, к которому приводится система (1.39), будет

$$\begin{aligned} -\frac{2L(K+K')}{x^3} + \sum_{i=1}^2 \frac{Q_i^2 F_i}{\left(\frac{2,5Q_i^2 F_i}{\frac{2Lb_i}{x} + A_i} \right)^{0,71}} + \sum_{j=3}^4 \frac{Q_j^2 F_j}{\left(\frac{2,5Q_j^2 F_j}{\frac{2Lb_j}{S_k - x} + A_j} \right)^{0,71}} + \\ + \sum_{i=1}^2 A_i \left(\frac{2,5Q_i^2 F_i}{\frac{2Lb_i}{x} + A_i} \right)^{0,29} + \sum_{j=3}^4 A_j \left(\frac{2,5Q_j^2 F_j}{\frac{2Lb_j}{S_k - x} + A_j} \right)^{0,29} + \\ + \sum_{i=1}^4 (r_e + r'_e)_i = 0. \end{aligned} \quad (1.43)$$

Уравнение решается методом итерации. После определения x_{opt} из (1.43) $S_{1, opt}$, $S_{2, opt}$, $S_{3, opt}$, $S_{4, opt}$ определяются по (1.41) и (1.42).

Нетрудно получить формулы для одновременного определения оптимальных размеров выемочных полей и сечений горных выработок при делении этажа на подэтажи, а также размеров блоков или пласлей и оптимальных сечений горных выработок в пределах блоков.

1.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УМЕНЬШЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ВЕНТИЛЯЦИЮ ПРИ ДЕГАЗАЦИИ ШАХТ И АВТОМАТИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ ШАХТ

Для уменьшения расхода электроэнергии главным вентилятором необходимо уменьшить его производительность или аэродинамическое сопротивление шахты.

Дегазация шахт позволяет уменьшать как Q , так и $R_{ш}$. Уменьшение производительности вентилятора Q базируется на снижении расходов воздуха, необходимых для проветривания участков.

Уменьшение расхода электроэнергии за счет уменьшения производительности вентилятора при дегазации шахт подсчитывается по формуле

$$\frac{R_{ш. ср} (Q^2 - Q'^2) 24 \cdot 365 t_s}{102 \eta_{сп}}, \text{ руб.}, \quad (1.44)$$

где $R_{ш. ср}$ — средняя величина аэродинамического сопротивления шахты, $\text{кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$;

t_s — срок службы этажа, лет;

$\eta_{сп}$ — среднее значение к. п. д. вентиляторной установки;

Q — производительность вентилятора после дегазации, $\text{м}^3/\text{с}$.

При возможности различной по интенсивности дегазации выемочных участков может быть снижен расход электроэнергии главным вентилятором. Так, если степень дегазации выемочных участков может регулироваться, то максимальную дегазацию необходимо производить на участке, по выработкам которого проходит направление максимальной депрессии.

Уменьшение расхода воздуха по направлению максимальной депрессии приводит к уменьшению депрессии этого направления, а значит, депрессии шахты.

Для сохранения нужного распределения воздуха внутри шахты должна уменьшаться депрессия вентиляционных окон других направлений, что приводит к уменьшению аэродинамического сопротивления шахты.

Уменьшение расхода электроэнергии за счет уменьшения аэродинамического сопротивления шахты при усиленной дегазации указанного участка за время отработки этажа подсчитывается по формуле

$$\frac{Q'^3 (R_{ш. ср} - R'_{ш. ср})}{102 \eta_{сп}} 24 \cdot 365 t_s, \quad (1.45)$$

где $R'_{ш. ср}$ — средняя величина аэродинамического сопротивления шахты после усиленной дегазации выемочного участка струи максимальной депрессии, $\text{кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Суммарное уменьшение расхода электроэнергии будет

$$\frac{R_{ш. ср} Q^2 - R'_{ш. ср} Q'^2}{102 \eta_{сп}} 24 \cdot 365 t_s, \text{ руб.} \quad (1.46)$$

Если расход воздуха на участке, по выработкам которого проходит направление максимальной депрессии, уменьшается на величину Q_{ym} , то

$$R'_{ш} = \frac{R_1 (Q_1 - Q_{ym})^2 + R_2 (Q_2 - Q_{ym})^2 + \dots + R_m (Q_m - Q_{ym})^2}{Q^2}, \quad (1.47)$$

где R_1, R_2, \dots, R_m — аэродинамические сопротивления 1, 2, ..., m выработок направления максимальной депрессии, кгс·с²/м⁶;

Q_1, Q_2, \dots, Q_m — расходы воздуха по этим выработкам, м³/с.

При автоматизации регулирования распределения воздуха возможны два режима. При первом общешахтный расход воздуха остается относительно неизменным, а увеличение расхода воздуха, поступающего на участок или несколько участков, производится за счет перераспределения воздуха внутри вентиляционной сети. Во втором случае изменяется расход воздуха в одной из ветвей (или в нескольких ветвях) при неизменном расходе воздуха в других ветвях за счет изменения общешахтного расхода воздуха.

Уменьшение расхода электроэнергии за счет уменьшения расчетной величины общешахтного расхода воздуха подсчитывается по формуле

$$132,13 \frac{R(Q^0 - Q^1)}{\eta} t_p, \text{ руб.} \quad (1.48)$$

где R — среднее аэродинамическое сопротивление шахты в течение рассматриваемого периода ее эксплуатации, кгс·с²/м⁶;

t_p — длительность периода, лет;

Q^0 — производительность вентилятора при работе автоматизированной системы, м³/с.

Автоматизация проветривания при первом режиме регулирования позволит изменять в течение суток расходы воздуха, проходящего через отдельные забои и участки, в соответствии с изменением величины метановыделения.

Уменьшение расхода электроэнергии при многократном в течение суток уменьшении общешахтного расхода воздуха будет

$$\left(132,13 \frac{RQ^0}{\eta} - \frac{N_p}{66,3} \sum_{i=1}^n \frac{R_i Q_i^2}{\eta_i} t_i \right) t_p, \text{ руб.} \quad (1.49)$$

где t_i — длительность i -го процесса, ч;

Q_i — производительность вентилятора при i -м уменьшении в течение суток, м³/с;

R_i — аэродинамическое сопротивление шахты, соответствующее производительности Q_i , кгс·с²/м⁶;

η_i — то же, для k и d вентилятора;

N_p — число рабочих дней в году;

n — число изменений режима вентиляции в течение суток.

Для уменьшения расхода электроэнергии можно идти по пути уменьшения депрессии шахты за счет уменьшения депрессии выработок направления максимальной депрессии. Это возможно при перераспределении воздуха в периоды с пониженным метановыделением в лавах таким образом, чтобы по выработкам направ-

ления максимальной депрессии имел место минимальный расход воздуха. В то же время по другим направлениям расход воздуха будет превышать минимально необходимый для данных направлений.

Уменьшение расхода электроэнергии за счет многократного в течение суток перераспределения воздуха с уменьшением расхода воздуха по выработкам направления максимальной депрессии

$$\left[132,13 \frac{RQ^3}{\eta} - \frac{N_p Q}{66,3\eta} \sum_{i=1}^n t_i \left(\sum_{k=1}^m R_k Q_k^2 \right)_i \right] t_i, \quad (1.50)$$

где t_i — длительность i -го периода с неизменным распределением воздуха, ч;

R_k, Q_k — аэродинамическое сопротивление k -й выработки направления максимальной депрессии и расход воздуха по ней;

m — число выработок, входящих в направление максимальной депрессии.

2. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

2.1. РАСЧЕТ РАСХОДА ВОЗДУХА ДЛЯ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ

Существующие официальные методики расчета расхода воздуха для шахт [86, 87] должны совершенствоваться за счет уточнения с обязательным одновременным упрощением. Не рассматривая в деталях указанный метод позабойного расчета общешахтного расхода воздуха, уточним некоторые его аспекты.

Общий расход воздуха для проветривания шахты с достаточной точностью может быть подсчитан по формуле

$$Q_{\Sigma} = k_{\text{рег}} \left(\sum_{i=1}^n Q_{\text{выч}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{об. об.}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{кам. пр.}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{конв.}} \right) + \sum_{i=1}^n Q_{\text{утеч.}} + Q_{\text{доп.}}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (2.1)$$

где $k_{\text{рег}}$ — коэффициент, учитывающий неточность регулирования распределения воздуха;

$\sum_{i=1}^n Q_{\text{выч}}$ — суммарный расход воздуха для проветривания n , выемочных участков, $\text{м}^3/\text{мин}$;

$\sum_{i=1}^n Q_{\text{об. об.}}$ — суммарный расход воздуха для обособленного проветривания n , подготовительных выработок, $\text{м}^3/\text{мин}$;

$\sum_{i=1}^n Q_{\text{кам. пр.}}$ — суммарный расход воздуха для n , камер, проветриваемых обособленно, $\text{м}^3/\text{мин}$;

$\sum_{i=1}^n Q_{\text{конв.}}$ — суммарный расход воздуха для обособленного проветривания n , конвейерных выработок, $\text{м}^3/\text{мин}$;

$\sum_{i=1}^n Q_{\text{утеч.}}$ — сумма утечек воздуха через n , вентиляционных сооружений;

$Q_{\text{доп}}$ — дополнительный расход воздуха для разжижения исходящих струй участков и подготовительных выработок (с концентрацией метана 1%) и метана, поступающего за пределы эксплуатационных участков, до концентрации 0,75%.

Остановимся на определении $Q_{\text{уч}}$, $Q_{\text{оч}}$, $Q_{\text{доп}}$:

$$Q_{\text{уч}i} = k_{\text{уч}i} Q_{\text{оч}i}, \quad (2.2)$$

где $k_{\text{уч}i}$ — коэффициент, учитывающий увеличение расхода воздуха для проветривания i -го участка;

$Q_{\text{оч}i}$ — расход воздуха для проветривания i -го очистного забоя, $\text{м}^3/\text{мин}$.

При отсутствии источников метанообразования, являющихся причиной накопления метана в выработанном пространстве, когда все утечки через выработанное пространство являются бесполезными,

$$k_{\text{уч}i} = 1 + \frac{p_{\text{у.н}i}}{100}, \quad (2.3)$$

где $p_{\text{у.н}i}$ — величина утечек воздуха через выработанное пространство для i -го выемочного участка, %.

При накоплении метана в выработанном пространстве и соблюдении неравенства

$$\frac{Q_{\text{оч}i}}{100} p_{\text{у.н}i} > 100 I_{\text{в.ш}}, \quad (2.4)$$

где $I_{\text{в.ш}}$ — выделение метана на вентиляционный штрек, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Если знак неравенства (2.4) меняется, то расход воздуха для проветривания выемочного участка определяется по формуле

$$Q_{\text{уч}i} = Q_{\text{оч}i} + 100 I_{\text{в.ш}i}. \quad (2.5)$$

Подсвеживание исходящей струи должно производиться, если необходимый расход воздуха, определенный по формуле (2.5), нельзя пропустить по рабочему пространству лавы и прилегающей части выработанного пространства с максимально допустимой согласно ПБ скоростью, т. е. при наличии неравенства

$$60 v_{\text{доп}} S_{\text{оч}} k_{\text{в.з}} < Q_{\text{оч}i} + 100 I_{\text{в.ш}i}. \quad (2.6)$$

где $v_{\text{доп}}$ — максимально допустимая скорость движения воздуха в призабойном пространстве лавы, $\text{м}/\text{с}$;

$S_{\text{оч}}$ — площадь призабойного пространства лавы, м^2 ;

$k_{\text{в.з}}$ — коэффициент, учитывающий движение воздуха по части выработанного пространства, непосредственно прилегающей к призабойному пространству.

Расход воздуха на подсвеживание вентиляционной струи i -го участка определяется по выражению

$$Q_{\text{в.с.з}i} = Q_{\text{оч}i} + 100 I_{\text{в.ш}i} - 60 v_{\text{доп}} S_{\text{оч}} k_{\text{в.з}}. \quad (2.7)$$

Расход воздуха для обособленного проветривания конвейерных выработок $Q_{\text{кон}}$ должен определяться по пылевому фактору, как произведение оптимальной скорости воздуха, определяемой величиной запыленности воздуха, на полезную площадь поперечного сечения конвейерной выработки.

Проведенные в конвейерной выработке шахты «Донецкая» производственного объединения «Торезантрацит» [85] замеры показывают, что величина оптимальной скорости с учетом пылевого фактора зависит от того, совпадают ли направления движения воздуха с направлением движения ленты конвейера или они противоположно направлены. В настоящее время при регламентировании скорости движения воздуха [86] указанный факт не учитывают.

Руководство по проектированию вентиляции шахт [86] рекомендует производить проверку общего расхода воздуха для шахты по разжижению метана в исходящей струе шахты до 0,75%, однако отсутствуют рекомендации по принятым мер, т. е. по пересчету расхода воздуха, если в исходящей струе шахты концентрация метана превышает 0,75%.

Такую проверку можно не производить, если при расчете общего расхода воздуха в формулу (2.1) включать $Q_{\text{кон}}$:

$$Q_{\text{кон}} = Q_{\text{л. в}} + \frac{\sum_{i=1}^{n_1} Q_{\text{г. в } i} + \sum_{i=1}^{n_2} Q_{\text{л. в } i}}{3} -$$

$$- \left[\sum_{i=1}^{n_1} Q_{\text{л. в } i} + \sum_{i=1}^{n_2} Q_{\text{г. в } i} + 0,43 \sum_{i=1}^{n_2} Q_{\text{л. в } i} \right], \text{ м}^3/\text{мин.} \quad (2.8)$$

где $Q_{\text{л. в}} = \frac{(I_{\text{л. в } 1} + I_{\text{л. в } 2} + \dots + I_{\text{л. в } n}) 100}{0,75}$ — расход воздуха для разжижения поступлений метана за пределами выемочных участков, $\text{м}^3/\text{мин}$;

$I_{\text{л. в } 1}, I_{\text{л. в } 2}, \dots, I_{\text{л. в } n}$ — дебиты метана в местах поступлений за пределами выемочных участков, $\text{м}^3/\text{мин}$;

n_2 — число выработок, проветриваемых вентиляторами местного проветривания;

$Q_{\text{г. в } i}$ — избыточный расход воздуха на участке по сравнению с необходимым для разжижения метана до 1%, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Для случая (2.3)

$$Q_{\text{г. в } i} = \frac{P_{\text{г. в } i}}{100} \cdot Q_{\text{г. в } i} \quad (2.9)$$

Для случая (2.4)

$$Q_{\text{ут. макс}} = \frac{P_{\text{в}} \cdot \eta}{100} Q_{\text{оч}} - 100 I_{\text{в. ш.}} \quad (2.10)$$

Для случая (2.5)

$$Q_{\text{ут. макс}} = 0.$$

2.2. ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Необходимость проверки вентиляторов на эффективность совместной работы возникает чаще всего при бурении на выработку действующей вентиляционной сети воздуховыдающей вентиляционной скважины с установкой на ней вентилятора при объединении двух шахт в одну вентиляционную систему и сохранении вентиляторов, работающих до объединения в разных вентиляционных системах.

Для действующей вентиляционной системы с двумя и более вентиляторами актуальным является выбор режимов работы вентиляторов, обеспечивающих эффективную совместную работу их на сети.

При проверке эффективности совместной работы вентиляторов вентиляционной системы используется известное положение, по которому параллельная работа вентиляторов разных типов (или одного типа при разных режимах работы) на одной воздуховод может быть вредной, если сопротивление воздуховода большое. При разветвленной вентиляционной сети и наличии участков сети, на которые вентиляторы работают индивидуально, указанное положение сохраняется после приведения вентиляторов в общее для них точки сети.

При фланговом расположении вентиляторов (рис. 2.1) определяется максимальная депрессия каждого из двух вентиляторов после приведения их в точку В:

$$h_{\text{max пр. в. } j} = h_{\text{max } j} - R'_j Q_{\text{min } j}^2 - R_j \frac{Q_{\text{min } j}^2}{\left(1 + \frac{\eta_j}{100}\right)^2}, \quad j = 1, 2, \quad (2.11)$$

где $h_{\text{max } j}$, $Q_{\text{min } j}$ — координаты граничной точки рабочей части j -го вентилятора;

η_j — процент внешних утечек воздуха j -го вентилятора (от расхода воздуха по каналу вентилятора);

R_j , R'_j — аэродинамическое сопротивление ветвей от общей точки В до канала j -го вентилятора (до точек С и D) и канала j -го вентилятора (СС' или DD'), кгс с³/м⁶.

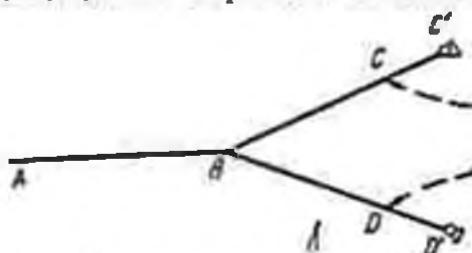


Рис. 2.1. Схема вентиляционной системы с двумя ветвями вентиляторами

Минимальная из двух максимальных приведенных в точку B вентиляторов $h_{\max \min} = \min \{h_{\max \text{ пр. } B_j}\}$ — сравнивается с депрессией точки пересечения характеристики общей ветви с сопротивлением $R_{об}$ и приведенной характеристики вентилятора с большей максимальной депрессией.

Должно соблюдаться неравенство

$$h_{\max \min} > \left[\frac{-b_{1j} \pm \sqrt{b_{1j}^2 - 4b_{0j} \left(b_{2j} - R_j' - \frac{R_j}{\left(1 + \frac{n_j}{100}\right)^2} - R_{об} \right)}}{2 \left(b_{2j} - R_j' - \frac{R_j}{\left(1 + \frac{n_j}{100}\right)^2} - R_{об} \right)} \right]^2, \quad (2.12)$$

где $R_{об}$ — аэродинамическое сопротивление общей для двух вентиляторов выработки AB , кгс·с²/м⁶.

Если $h_{\max \text{ пр. } B_1} > h_{\max \text{ пр. } B_2}$, то в неравенстве (2.12) $j = 1$, в противном случае $j = 2$.

В неравенстве (2.12) b_0 , b_1 , b_2 — постоянные коэффициенты полинома 2-й степени, аппроксимирующего характеристику вентиляторов.

$$h = b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2. \quad (2.13)$$

Для описания характеристик вентиляторов разных типов кроме уравнения (2.13) используются уравнения

$$h = b_0 - b_1 Q \quad (2.14)$$

$$h = b_0 - b_2 Q^2. \quad (2.15)$$

При теоретических исследованиях формула (2.13) позволяет в наиболее общем виде учесть также случаи описания характеристики вентилятора линейным уравнением или уравнением параболы. Так, для перехода от уравнения (2.13) к уравнению (2.14) достаточно принять $b_2 = 0$ и $b_1 < 0$, а от уравнения (2.13) к уравнению (2.15) — $b_1 = 0$ и $b_2 < 0$.

При соблюдении неравенства (2.12) совместная работа двух вентиляторов, установленных на флангах шахтного поля, будет эффективной. Если неравенство (2.12) не соблюдается, необходимо изменить режим работы вентиляторов или провести мероприятия по изменению депрессии сети. В первом случае необходимо увеличить угол установки лопаток вентилятора с меньшей максимальной приведенной депрессией или уменьшить угол установки лопаток вентилятора с большей приведенной максимальной депрессией.

Снижение депрессии должно производиться прежде всего для ветви с сопротивлением $R_{об}$. Может производиться снижение депрессии для части сети, на которую работает вентилятор с большей максимальной (после приведения в точку B) депрессией.

2.3. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ПРЕДЕЛАХ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫРАБОТОК

Рассмотрим случай регулирования распределения воздуха путем уменьшения аэродинамического сопротивления выработок на примере параллельного соединения, представленного на рис. 2.2.

Обозначим аэродинамическое сопротивление ветви 2—9—10—6 через R_1 , ветви 2—3—4—5—6 — через R_2 . При естественном распределении воздуха по ветви с сопротивлением R_1 расход воздуха равен Q_1 , по ветви с сопротивлением R_2 расход будет Q_2 .

Необходимо перераспределить воздух таким образом, чтобы по левой ветви расход воздуха был $Q_1' > Q_1$. Тогда по правой будет поступать $Q_2' < Q_2$.

Чтобы получить указанное перераспределение воздуха, необходимо сопротивление левой ветви R_1 уменьшить на величину $R_{ум}$, т. е.

$$(R_1 - R_{ум}) Q_1'^2 = R_2 Q_2'^2, \quad (2.16)$$

откуда

$$R_{ум} = R_1 - R_2 m^2, \quad (2.17)$$

где

$$m = \frac{Q_2'}{Q_1'}$$

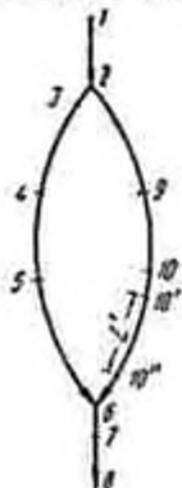


Рис. 2.2. Схема для расчета регулирования распределения воздуха на выемочном участке путем уменьшения аэродинамического сопротивления выработок.

Рассмотрим способ уменьшения аэродинамического сопротивления левой ветви путем расширения выработок этой ветви.

Предположим, что для перераспределения воздуха решено произвести расширение вентиляционного штрека на участке длиной L' между точками $10'$ и $10''$.

Обозначим сечения вентиляционного штрека на участке расширения до и после расширения соответственно S и S' , периметры через P и P' и сопротивления через R_2^* и $R_2'^*$.

Для упрощения решения задачи будем пренебрегать изменением коэффициента аэродинамического сопротивления вентиляционного штрека, связанным с расширением выработок.

Очевидно, что

$$R_2^* - R_2'^* = R_{ум}. \quad (2.18)$$

Подставив в формулу (2.18) значения параметров, получим

$$\frac{\alpha CL'}{S^3} - \frac{\alpha CL'}{S'^3} = R_1 - R_2 \pi^2, \quad (2.19)$$

откуда

$$S = \sqrt{\frac{\alpha CL' S'^3}{\alpha CL' - R_1 S'^3 + R_2 \pi^2 S'^3}}. \quad (2.20)$$

Если распределение воздуха производят путем перекрепления выработки крепью с меньшим значением коэффициента аэродинамического сопротивления (или путем обшивки выработки), то может возникнуть необходимость определения этого коэффициента для нового вида крепи или же длины, на которой необходимо перекрепить (обшить) выработку.

В первом случае заданной является длина, на которой производится перекрепление, во втором случае известна величина коэффициента аэродинамического сопротивления новой крепи.

Рассмотрим случай, представленный на рис. 2.2, когда необходимо увеличить расход воздуха, поступающего в ветвь 2—2—10—6, путем перекрепления вентиляционного штрека на участке длиной L' . Принимаем те же обозначения, что и при решении задачи перераспределения воздуха путем расширения сечения выработки. Кроме того, обозначим через α коэффициент аэродинамического сопротивления выработки до перекрепления, а через α' — коэффициент аэродинамического сопротивления выработки после перекрепления.

Если при перекреплении выработки новой крепью не изменяется величина площади и конфигурация поперечного сечения выработки, т. е. $S = S'$, $P = P'$, то

$$\frac{\alpha PL'}{S^3} - \frac{\alpha' PL'}{S^3} = R_1 - R_2 \pi^2, \quad (2.21)$$

откуда

$$\alpha' = \frac{\alpha PL' - R_1 S^3 + R_2 \pi^2 S^3}{PL'}, \text{ кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4. \quad (2.22)$$

Если при перекреплении изменяются величина площади и конфигурация сечения выработки, то

$$\alpha' = \frac{S^3 (\alpha PL' - R_1 S^3 + R_2 \pi^2 S^3)}{P' L' S'^3}. \quad (2.23)$$

При постоянных величине площади и конфигурации поперечного сечения выработки длина вентиляционного штрека L' , на которой необходимо перекрепить выработку крепью с известной величиной коэффициента аэродинамического сопротивления α' , определяется по формуле

$$L' = \frac{S^3 (R_1 - R_2 \pi^2)}{P (\alpha - \alpha')}. \quad (2.24)$$

При изменении площади и конфигурации сечения выработки

$$L' = \frac{S^2 S'^2 (R_1 - R_1 m^2)}{\alpha P S'^2 - 2 P' S^2} \quad (2.25)$$

Рассмотрим случай уменьшения сопротивления ветви путем дополнительного разветвления ее, т. е. проведения новой выработки параллельно какой-либо выработке, входящей в ветвь, требующую увеличения расхода воздуха. Пусть $Q_1' > Q_1$, $Q_2 < Q_2'$.

Предположим, что параллельная выработка проводится на участке откаточного штрека (рис. 2.3)

Обозначим аэродинамическое сопротивление участка откаточного штрека на участке ACD через R_1' , а сопротивление параллельной выработки ABD — через R .

Из формулы для определения аэродинамического сопротивления параллельного соединения $R_{\text{сп}}$

$$R = \frac{R_{\text{сп}} R_1'}{(\sqrt{R_1'} - \sqrt{R_{\text{сп}}})^2} \quad (2.26)$$

Так как

$$R_{\text{сп}} = R_1 - R_{\text{ум}} \quad (2.27)$$

то

$$R = \frac{R_1'^2 - R_1' R_{\text{ум}}}{(\sqrt{R_1'} - \sqrt{R_1' - R_{\text{ум}}})^2} \quad (2.28)$$

$R_{\text{ум}}$ определяется из формулы (2.15).

Зная сопротивление параллельной выработки, найденное по формуле (2.28), можно определить необходимое сечение ее S или же выбрать крепь выработки по величине коэффициента аэродинамического сопротивления α при заданной длине выработки L . По величине сопротивления можно определить длину параллельной выработки L при заданных сечении S и коэффициенте аэродинамического сопротивления выработки α .

2.4 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В СЛОЖНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ

При регулировании распределения воздуха с применением регулирующих устройств составляется и решается система линейных уравнений, в которых неизвестными являются аэродинамические сопротивления регуляторов.

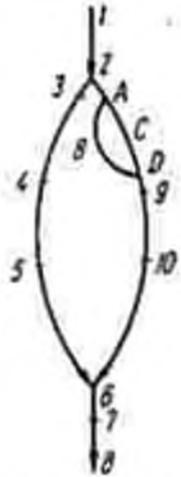


Рис. 2.3. Схема для расчета регулирования распределения воздуха на выветочном участке путем дополнительного разветвления откаточной сети

Система линейных уравнений может составляться путем описания вентиляционной сети по направлениям.

Число уравнений в этом случае определяется числом направлений в сети за вычетом направления максимальной депрессии.

Вторым путем составления системы уравнений является описание контуров сети. Число уравнений в системе равно $n' - N + 1$, где n' — число ветвей, N — число узловых пунктов.

Если число регуляторов в сети (число неизвестных) равно числу уравнений, то система уравнений будет определенной и ее корни можно найти методом исключения неизвестных Гаусса. Число регуляторов может при расстановке в сети оказаться больше числа уравнений, и тогда должна решаться задача линейного программирования.

При приведении матрицы к треугольному виду одновременно устанавливается совместность уравнений системы. Часто решение системы уравнений упрощается, если последняя распадается на ряд независимых уравнений или систем уравнений.

Решение поставленной задачи путем описания контуров рассмотрим для сети, приведенной на рис. 2.4.

Пусть с максимальной депрессией будет направление 1—2—3—4—5—6—7. Расстановка регуляторов показана на рисунке.

Составим систему уравнений

$$\begin{aligned}
 R_{21}Q_{21}^2 - R_{22}Q_{22}^2 - (R_{23} + x_1)Q_{23}^2 &= 0; \\
 R_{146}Q_{146}^2 - (R_{147} + x_2)Q_{147}^2 &= 0; \\
 R_{14}Q_{14}^2 + (R_{146} + x_2)Q_{146}^2 + R_{147}Q_{147}^2 - (R_{17} + x_3)Q_{17}^2 &= 0; \\
 (R_{13} + x_1)Q_{13}^2 + R_{34}Q_{34}^2 + (R_{17} + x_3)Q_{17}^2 - & \\
 - (R_{2,13} + x_4)Q_{2,13}^2 - (R_{12,11} + x_5)Q_{12,11}^2 - & \\
 - (R_{14,7} + x_6)Q_{14,7}^2 &= 0; \\
 R_{12,13}Q_{12,13}^2 + (R_{12,11} + x_5)Q_{12,11}^2 - R_{12,14}Q_{12,11}^2 &= 0; \\
 R_{12}Q_{12}^2 + R_{23}Q_{23}^2 + (R_{2,13} + x_4)Q_{2,13}^2 - & \\
 - (R_{1,11} + x_7)Q_{1,11}^2 - R_{11,17}Q_{11,17}^2 - & \\
 - R_{12,14}Q_{12,13}^2 &= 0; \\
 (R_{1,11} + x_7)Q_{1,11}^2 - R_{17}Q_{17}^2 - (R_{14,7} + x_6)Q_{14,7}^2 - & \\
 - R_{12,14}Q_{12,13}^2 &= 0; \\
 (R_{14,7} + x_6)Q_{14,7}^2 - R_{14,10}Q_{14,10}^2 &= 0.
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Рис. 2.4. Схема для расчета ветвлений и точек для сопротивлений регуляторов

Решение системы (2.29) довольно просто, так как первое, второе, пятое и восьмое уравнения содержат по одной неизвестной. Третье уравнение легко решается после решения второго, седьмое после решения восьмого, шестое после решения седьмого, а четвертое после решения первого, третьего, пятого и шестого уравнений.

Поставленную задачу можно решить и другим путем. При заданном распределении воздуха определяются расчетные аэродинамические сопротивления выработок. За известные принимаются сопротивления выработок направления максимальной депрессии и откаточного горизонта всех других направлений. Система линейных уравнений составляется, как и для вышеописанного варианта задачи. Найденные корни системы уравнений будут расчетными сопротивлениями выработок.

По разности расчетных и фактических (принятых по другим мотивам) аэродинамических сопротивлений выработок находят необходимые аэродинамические сопротивления регуляторов.

При решении задачи с применением линейного программирования регуляторы предварительно расставляются не только на выработках вентиляционного, но также и на выработках откаточного горизонта. Регулирование распределения воздуха путем уменьшения аэродинамического сопротивления выработок целесообразно при необходимости увеличении расхода воздуха на выработках направления максимальной депрессии, и часто ставится цель одновременно уменьшить депрессию шахты.

Мероприятия по уменьшению аэродинамического сопротивления должны проводиться для выработок направления максимальной депрессии, а в отдельных случаях одновременно также и для выработок, входящих в направления с последующими по величине депрессиями.

Так как заданная депрессия меньше фактической депрессии сети, все направления в сети можно разбить на две группы: направления, имеющие депрессию, меньшую заданной, и направления с депрессией, большей заданной. На выработках, входящих в первую группу направлений, устанавливаются регулирующие устройства. Сопротивления выработок второй группы направлений (всех или некоторых из них) должны уменьшаться с тем, чтобы депрессии этих направлений стали равными между собой и новой (заданной) депрессии сети.

Обозначая аэродинамическое сопротивление регуляторов и величину снижения аэродинамических сопротивлений отдельных выработок как переменные x , и составляя уравнения по направлениям в сети или по контурам, получим число переменных x , значительно больше, чем число уравнений, описывающих вентиляционную сеть.

Рассмотрим вентиляционную сеть, представленную на рис. 2.5. Предположим, что направлением максимальной депрессии в сети является струя 1—2—3—4—5—6.

Пусть депрессия шахты необходимо снизить до величины h_0 , при этом $h_{\text{норм}} < h_0 < h_{\text{норм}}$.

Направление 1-8-9-6-10-6 имеет наибольшую депрессию среди приближающихся в конечной точке разветвления.

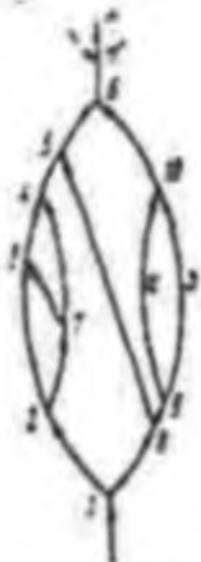


Рис. 2.4. Схема вентиляционной сети

При составлении вентиляционной сети для выработки направления максимальной депрессии в показанную модель в качестве переменных выступают уменьшения аэродинамического сопротивления, для выработок направлений, приходящих к направлению максимальной депрессии в конечной точке разветвления и имеющих депрессию, меньшую заданной депрессии шахты, вводятся аэродинамические сопротивления регулируемых устройств. Для выработок других направлений одновременно обеспечивается уменьшение аэродинамического сопротивления выработок и сопротивлений регулируемых устройств.

Запишем задачу линейного программирования для вентиляционной сети, показанной в рис. 2.5. Математическая формулировка задачи такова: найти минимум линейной формы

$$\begin{aligned}
 & - Q_{12}x_1 - Q_{23}x_2 - Q_{34}x_3 - Q_{45}x_4 - Q_{56}x_5 - Q_{67}x_6 - Q_{78}x_7 - Q_{89}x_8 - \\
 & - Q_{90}x_9 + Q_{1011}x_{10} + Q_{1112}x_{11} + Q_{1213}x_{12} + Q_{1314}x_{13} + Q_{1415}x_{14} + \\
 & + Q_{1516}x_{15} + Q_{1617}x_{16} + Q_{1718}x_{17} + \sum W = \min \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned}
 & Q_{12}^2x_1 + Q_{23}^2x_2 + Q_{34}^2x_3 + Q_{45}^2x_4 + Q_{56}^2x_5 = h_{12} - h_{11}; \\
 & - Q_{12}^2x_1 + Q_{23}^2x_2 + Q_{34}^2x_3 - Q_{45}^2x_4 - Q_{56}^2x_5 = -h_{23} + h_{22}; \\
 & - Q_{12}^2x_1 - Q_{23}^2x_2 + Q_{34}^2x_3 + Q_{45}^2x_4 - Q_{56}^2x_5 = -h_{34} + h_{33}; \\
 & Q_{12}^2x_1 - Q_{23}^2x_2 - Q_{34}^2x_3 - Q_{45}^2x_4 + Q_{56}^2x_5 + Q_{67}^2x_6 + Q_{78}^2x_7 + \\
 & + Q_{89}^2x_8 - Q_{90}^2x_9 - Q_{1011}^2x_{10} = -h_{1213} + h_{1212}; \\
 & - Q_{12}^2x_1 - Q_{23}^2x_2 + Q_{34}^2x_3 - Q_{45}^2x_4 - Q_{56}^2x_5 - Q_{67}^2x_6 - \\
 & - Q_{78}^2x_7 = -h_{2314} + h_{2313}; \\
 & Q_{1011}^2x_{10} - Q_{1112}^2x_{11} = -h_{1011} + h_{1010};
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}
 & R_{12} - x_1 \geq A_1; \quad R_{23} - x_2 \geq A_2; \quad R_{34} - x_3 \geq A_3; \\
 & R_{45} - x_4 \geq A_4; \quad R_{56} - x_5 \geq A_5; \quad R_{67} - x_6 \geq A_6; \\
 & R_{78} - x_7 \geq A_7; \quad R_{89} - x_8 \geq A_8; \quad R_{90} - x_9 \geq A_9;
 \end{aligned}$$

$$x_i > 0; \quad i = 1, 2, \dots, 18.$$

где $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ — величины уменьшения аэродинамических сопротивлений выработок соответственно 1—2, 2—3, 3—4, 4—5, 5—6, 2—7, 7—3, 7—4, 4—5, 5—6, кгс с²/м⁶.

$x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}$ — аэродинамические сопротивления регуляторов, установленных соответственно на выработках 2—7, 7—3, 7—4, 8—5, 1—8, 8—9, 9—а—10, 9—а—10, 10—6, кгс с²/м⁶.

h_{ij} — депрессия выработки между i -й и j -й точками при заданном распределении воздуха, кгс/м²;

ΣW — суммарный расход электроэнергии на продвижение воздуха по выработкам (без учета регуляторов) до уменьшения аэродинамических сопротивлений;

A_1, A_2, \dots, A_9 — минимально возможные аэродинамические сопротивления выработок после проведения мероприятий по снижению депрессий.

Равенства в системе ограничений записаны в соответствии с законом Кирхгофа для вентиляционных сетей.

Задача линейного программирования решается симплексным методом. В пункте 2.6 (пример 1) приведено численное решение задачи линейного программирования по расчету величины уменьшения аэродинамического сопротивления выработок и аэродинамического сопротивления регуляторов.

Найдя по вышесказанной методике величину, на которую необходимо уменьшить аэродинамическое сопротивление i -й выработки, выбирают способ уменьшения сопротивления и рассчитывают его параметры.

Исходным является уравнение

$$R_i - R_{y_{ui}} = \alpha \frac{Pl}{S^3}. \quad (2.32)$$

Из уравнения (2.32) можно определить необходимую величину расширения выработки на полную длину, а также длину, на которую необходимо произвести расширение выработки, если величина расширения задана, необходимую величину коэффициента α , если перекрепление или обшивка производится на полную длину, а также длину, на которую необходимо перекрепить или обшить выработку, если новое значение коэффициента α задано.

2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЫРАБОТОК ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ, ПЕРЕКРЕПЛЕНИЯ ИЛИ ОБЛИЦОВКИ

Величина снижения депрессии (при фиксированном распределении воздуха) задана. В ряде случаев известна величина, до которой расширяются сечения выработок, или известен коэффициент α выработок для нового вида крепи, принятого для закрепления, или коэффициент α выработки после облицовки.

Если $h_m > h_m^* > h_{11}$ (h_m — депрессия шахты, h_m^* — заданная депрессия шахты после проведения работ по снижению депрессии, h_{11} — депрессия второго по величине в сети направления), то для снижения общешахтной депрессии проводятся работы только на выработках направления максимальной депрессии. Если новая заданная депрессия шахты меньше суммарной депрессии выработок ряда направлений, то задача решается индивидуально для выработок всех этих направлений.

Задача записывается так же, как и в первом случае для одного направления максимальной депрессии.

При расширении выработок функция цели в общем виде будет

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{2,3}} x_i Q_i^3 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{2,3}} x_{m+i} Q_i^3 + W \rightarrow \min. \quad (2.33)$$

Систему ограничений можно записать

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{2,3}} x_i Q_i^3 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{2,3}} x_{m+i} Q_i^3 + h = h_m^* \\ x_i + x_{m+i} = l_i; \quad x_i, x_{m+i} \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

где m — число выработок, входящих в направление максимальной депрессии;

S_i, S_i^* — площади поперечного сечения i -й выработки до и после расширения;

x_i — длина участка i -й выработки при $i = 1, 2, \dots, m$ с расширенной площадью сечения, при $i = m + 1, m + 2, \dots, 2m$ — оставшейся не расширенной;

l_i — длина i -й выработки направления максимальной депрессии;

W, h — соответственно расход электроэнергии на продвижение воздуха по выработкам (на которых расширения сечений не предполагаются) и депрессия этих выработок.

При проведении работ по уменьшению коэффициента α функция цели в общем виде будет

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{2,3}} x_i Q_i^3 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{2,3}} x_{m+i} Q_i^3 + W \rightarrow \min. \quad (2.35)$$

Система ограничений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{3/8}} x_i Q_i^3 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{C_i}{S_i^{3/8}} x_{m+i} Q_i^3 + h = h_m^i; \\ x_i + x_{m+i} = l_i; \quad x_i, x_{m+i} \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

где α_i, α'_i — коэффициенты аэродинамического сопротивления i -й выработки до и после обшивки.

Две поставленные задачи записаны для направления максимальной депрессии. Так же записываются задачи для других направлений, сумма депрессий выработок которых больше новой заданной депрессии шахты.

В пункте 2 б (пример 2) приведено численное решение задачи линейного программирования по определению последовательности выработок для расширения.

2.6 ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Рассчитать с применением методов линейного программирования уменьшение аэродинамического сопротивления выработок и параметров регуляторов при перераспределении воздуха в сети.

Задача решается для вентиляционной сети, изображенной на рис. 2.6.

Пусть направление максимальной депрессии будет 1—2—а—3—4. Математическая модель приводится ниже.

Функция цели

$$\begin{aligned} - Q_{12}^3 x_1 - Q_{2a}^3 x_2 - Q_{31}^3 x_3 - Q_{2b}^3 x_4 + \\ + Q_{2a}^3 x_5 + Q_{15}^3 x_6 + Q_{2b}^3 x_7 + \\ + Q_{2c}^3 x_8 + Q_{2d}^3 x_9 + \sum W \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} Q_{12}^3 x_1 + Q_{2a}^3 x_2 + Q_{31}^3 x_3 &= h_{11} - h_{14}; \\ - Q_{2a}^3 x_2 + Q_{15}^3 x_4 - Q_{2b}^3 x_1 &= -h_{2a} + h_{2b}; \\ - Q_{12}^3 x_1 - Q_{2a}^3 x_2 - Q_{15}^3 x_4 + Q_{2b}^3 x_5 - Q_{15}^3 x_6 - \\ - Q_{2c}^3 x_7 - Q_{2d}^3 x_8 &= -h_{12a} + h_{12b}; \\ Q_{2c}^3 x_7 - Q_{2d}^3 x_8 &= -h_{2c} + h_{2d}; \\ R_{12} - x_1 &\geq A_1; \quad R_{2a} - x_2 \geq A_2; \\ R_{2b} - x_3 &\geq A_3; \quad R_{2b} - x_4 \geq A_4; \\ x_i &\geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, 9. \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

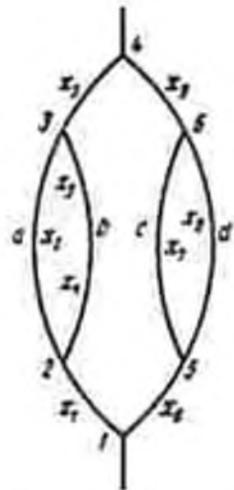


Рис. 2.6. Сеть вентиляционная соединенная для численного примера

Численные значения параметров приведены в табл. 2.1. Необходимо снизить депрессию сети до $h_m = 120$ кгс/м². Функция цели

$$-27x_1 - 8x_2 - 27x_3 - x_4 + x_5 + 8x_6 + x_7 + x_8 + 8x_9 + 5,26 \rightarrow \min. \quad (2.39)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} 9x_1 + 4x_2 + 9x_3 &= 0,48; \\ 4x_1 - x_4 + x_5 &= 0,32; \\ 9x_1 + 9x_2 + x_6 - x_7 + 4x_8 + x_9 + 4x_{10} &= 0,60; \\ x_7 - x_8 &= 0,02; \\ x_1 < 0,02; \quad x_2 < 0,05; \quad x_3 < 0,055; \\ x_4 < 0,04; \quad x_i > 0; \quad i = 1, 2, \dots, 9. \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

Приведем математическую модель к канонической форме и дадим математическую формулировку задачи.

Таблица 2.1

Параметры	Участки сети (рис. 2.4)							
	1-2	1-4-3	2-3-4	3-4	1-4	1-4-4	3-4-6	4-6
Расход воздуха Q , м ³ /с	30	20	10	30	20	10	10	20
Аэродинамическое сопротивление R , кгс·с ² /м ⁵	0,06	0,1	0,08	0,07	0,06	0,08	0,1	0,07
Минимально возможное сопротивление A , кгс·с ² /м ⁵	0,03	0,08	0,04	0,066	—	—	—	—
Депрессия h , кгс/м ²	45	40	8	63	20	8	10	28

Находим максимум линейной формы

$$27x_1 + 8x_2 + 27x_3 + x_4 - x_5 - 8x_6 - x_7 - x_8 - 8x_9 - 5,26 \rightarrow \max. \quad (2.41)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} 9x_1 + 4x_2 + 9x_3 &= 0,48; \\ 4x_1 - x_4 + x_5 &= 0,32; \\ 9x_1 + 9x_2 + x_6 - x_7 + 4x_8 + x_9 + 4x_{10} &= 0,60; \\ x_7 - x_8 &= 0,02; \\ x_1 &+ x_{10} = 0,02; \\ x_2 &+ x_{11} = 0,05; \\ x_3 &+ x_{12} = 0,055; \\ x_4 &+ x_{13} = 0,04. \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Приведем систему (2.42) к единичному балансу:

$$\begin{array}{rcl}
 x_1 + 0,444x_2 + x_3 & & = 0,053; \\
 -4x_2 & -x_4 + x_5 & = 0,32; \\
 & x_6 + 0,25x_7 + x_8 & = 0,115; \\
 & x_9 - x_{10} & = 0,02; \\
 x_1 & & + x_{10} & = 0,02; \\
 & x_2 & & + x_{11} & = 0,05; \\
 -x_1 - 0,444x_2 & & & + x_{12} & = 0,0002; \\
 & x_4 & & + x_{13} & = 0,04;
 \end{array} \quad (2.43)$$

Выразим функцию цели через свободные переменные

$$\begin{aligned}
 z &= 27x_1 + 8x_2 + 27(0,053 - x_1 - 0,444x_2) + x_4 - (0,32 - 4x_2 + \\
 &+ x_4) - 8(0,115 - 0,25x_7 - x_8) - (0,02 - x_9) - 8x_9 - 5,26 = \\
 &= 0,012x_4 - 5,089 = \max.
 \end{aligned}$$

Запишем функцию цели в виде

$$z - 0,012x_4 = -5,089. \quad (2.44)$$

Решим задачу симплекс-методом (табл. 2.2).

В индексной строке нет отрицательных элементов — значит задача решена.

Функция цели достигает максимума при следующих значениях переменных: $x_2 = 0,031$, $x_4 = 0,12$, $x_6 = 0,115$, $x_7 = 0,02$, $x_{10} = 0,02$, $x_1 = 0,05$, $x_{12} = 0,024$, $x_{13} = 0,04$ кгс с³/м³, т. е. необходимо уменьшить сопротивления выработок 2—а—3 и 3—4 и поставить регуляторы на выработках 2—б—3, б—4, 5—с—6.

Пример 2. Рассчитать с использованием методов линейного программирования последовательность выработок для расширения при заданном снижении депрессии шахты.

Задача решается для вентиляционной сети на рис. 2.5. Условия задачи приведены в табл. 2.3.

Депрессии направлений:

$$\begin{aligned}
 h_{1-2-3-4-5-6} &= 330,87; & h_{1-2-3-4-6} &= 186,75; \\
 h_{1-2-4-5-6} &= 161,75; & h_{1-2-5-6} &= 188,62; \\
 h_{1-2-3-4-5} &= 259,62; & h_{1-2-3-4-6} &= 314,87 \text{ кгс/м}^2
 \end{aligned}$$

Как видно, максимальную депрессию имеет направление 1—2—3—4—5—6. Снижим депрессию сети до 200 кгс/м².

Таблица 22

Вариант	Коэффициент	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	$\frac{b_{12}}{a_{12}}$
x_2	0,053	1	0,444	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{0,063}{0,444}$
x_6	0,32	0	4	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{0,32}{4}$
x_9	0,115	0	0	0	0	0	1	0	0,25	1	0	0	0	0	0	
x_7	0,02	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	
x_{10}	0,02	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
x_{11}	0,05	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	$\frac{0,05}{1}$
x_{12}	0,002	-1	-0,444	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
x_{13}	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
x	-5,089	0	-0,012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
x_3	0,031	0														
x_4	0,12	0														
x_5	0,115	0														
x_7	0,02	0														
x_{10}	0,02	0														
x_1	0,05	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
x_{11}	0,024		0													
x_{12}	0,04		0													
x	-5,083	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+0,012	0	0	

Таблица 24

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	$\frac{b_i}{a_{ij}}$
1000,000	0,520	1,726	0,700	1	0	0	0	0	$\frac{1000,000}{1,726}$
1 000	1	0	0	0	1	0	0	0	
200	0	1	0	0	0	1	0	0	$\frac{200}{1}$
1 000	0	0	1	0	0	0	1	0	
101,644	-0,520	-1,726	-0,700	0	0	0	0	1	
12 296,463	0,039	3,19	0,634	0	0	0	0	0	
353,156	0,520	0	0,700	1	0	-1,726	0	0	$\frac{353,156}{0,700}$
1 000	1	0	0	0	1	0	0	0	
200	0	1	0	0	0	1	0	0	
1 000	0	0	1	0	0	0	1	0	$\frac{1 000}{1}$
446,844	-0,520	0	-0,700	0	0	1,726	0	1	
11 658,463	0,039	0	0,634	0	0	-3,19	0	0	
504,509	0,743	0	1	1,420	0	-2,466	0	0	
1 000	1	0	0						
200	0	0	0						
495,491	-0,743	0	0						
800	0	0	0						
11 380,050	-0,358	0	0	-0,761	0	-1,873	0	0	

x_8
 x_7
 x_6
 x_5
 x_4
 x_3
 x_2
 x_1
 x_0
 z

Функция цели

$$3,955x_1 + 5,779x_2 + 3,998x_3 + 6,909x_4 + 1,705x_5 + 1,371x_6 + 1,451x_7 + 2,507x_8 + 3796,5 = \min. \quad (2.47)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} 0,066x_1 + 0,162x_2 + 0,080x_3 + 0,115x_4 + 0,028x_5 + 0,039x_6 + 0,029x_7 + 0,042x_8 + 50,62 &= 200; \\ x_1 + x_2 &= 1000; \\ x_1 + x_3 &= 200; \\ x_2 + x_4 &= 1000; \\ x_1 + x_5 &= 800. \end{aligned} \right\} (2.48)$$

Ранг системы ограничений 5.

Приведем систему ограничений к единичному базису:

$$\begin{aligned} x_1 + 0,520x_2 + 1,726x_3 + 0,7x_4 &= 698,356; \\ x_2 + x_1 &= 1000; \\ x_3 + x_2 &= 200; \\ x_4 + x_3 &= 1000; \\ x_5 - 0,52x_1 - 1,726x_2 - 0,7x_3 &= 101,644. \end{aligned}$$

Выразим функцию цели через свободные переменные:

$$\begin{aligned} 3,955x_1 + 5,779x_2 + 3,998x_3 + 6,909(698,356 - 0,520x_1 - 1,726x_2 - 0,700x_3) + 1705(1000 - x_1) + 1,371(200 - x_1) + 1,451(1000 - x_2) + 2,507(101,644 + 0,520x_1 + 1,726x_2 + 0,700x_3) + 3796,5 = -0,039x_1 - 3,19x_2 - 0,534x_3 + 12296,463 = \min. \end{aligned}$$

Математическая формулировка задачи: найти минимум функции цели

$$z = -0,039x_1 - 3,19x_2 - 0,534x_3 + 12296,463 = \min \quad (2.49)$$

при следующих ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} x_1 + 0,52x_2 + 1,726x_3 + 0,7x_4 &= 698,356; \\ x_2 + x_1 &= 1000; \\ x_3 + x_2 &= 200; \\ x_4 + x_3 &= 1000; \\ x_5 - 0,52x_1 - 1,726x_2 - 0,7x_3 &= 101,644. \end{aligned} \right\} (2.50)$$

Задача решается симплексным методом в табл. 2.4

Согласно табл. 2.4 решением задачи будет значение переменных $x_1 = 200$ м, $x_2 = 504,5$ м, $x_3 = 1000$ м, $x_4 = 495,5$ м, $x_5 = 800$ м. т. е. нужно расширить выработку 2—3 до заданного сечения на всю длину и выработку 3—4 на длину 504,5 м.

3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СКВАЖИНЫ

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ДИАМЕТРА И ЧИСЛА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

Метод определения оптимальных диаметра и числа параллельных скважин относится как к воздуховыдающим, так и к воздухоподлющим скважинам.

При бурении одной скважины или группы параллельных скважин оптимальный диаметр, а в последнем случае и оптимальное число скважин в группе определяются из минимальных затрат на бурение скважин и электроэнергию для продвижения воздуха по скважинам.

Затраты на бурение l м скважины с достаточной точностью описываются аппроксимирующим полиномом второй степени [66]. Для группы n параллельных скважин затраты на бурение l м определяются

$$k = |1 + (n - 1)k_1|(c_1 + c_2D + c_3D^2), \text{ руб.} \quad (3.1)$$

где c_1, c_2, c_3 — постоянные коэффициенты;

D — диаметр скважины, м;

k_1 — коэффициент, учитывающий изменение затрат на бурение каждой последующей скважины при бурении нескольких скважин.

С учетом затрат на электроэнергию функция затрат для группы скважин будет

$$l(n, D) = |1 + (n - 1)k_1|(c_1 + c_2D + c_3D^2) + \frac{6,52Q_{\text{всв}}^2 Q_0}{n^2 \eta D^4} \text{ тл. руб.} \quad (3.2)$$

Если на скважине установлен вентилятор, то производительность вентилятора $Q_0 = Q_{\text{всв}} + Q_{\text{ут}}$ (где $Q_{\text{всв}}$ — расход воздуха по скважине и внешние утечки воздуха, м³/с).

При заданном диаметре вентиляционной скважины можно определить оптимальное число скважин в группе, при заданном числе скважин в группе, в том числе при $n = 1$, можно определить оптимальный диаметр скважин.

При $D = \text{const}$ оптимальное число скважин определяется из уравнения

$$\frac{df}{dn} = c_1 + c_2 D + c_3 D^2 - \frac{2 \cdot 6,5 \alpha Q_{\text{св}}^2 Q_n \tau t}{n^3 \eta D^3} \tau t = 0 \quad (3.3)$$

и

$$n_{\text{оп}} = \left(\frac{13 \alpha Q_{\text{св}}^2 Q_n \tau t}{\eta D^3 (c_1 + c_2 D + c_3 D^2)} \right)^{0,25} \quad (3.4)$$

Полученное значение $n_{\text{оп}}$ округляется до ближайшего целого, т. е. $n_{n, \text{оп}} = E(n_{\text{оп}})$ или $n_{n, \text{оп}} = E(n_{\text{оп}} + 1)$.

Если $n_{\text{оп}}$ значительно отличается от целого числа, то определяется величина расходов при двух значениях $n_{n, \text{оп}} = E(n_{\text{оп}})$ и $n_{n, \text{оп}} = E(n_{\text{оп}} + 1)$. Меньшая величина расходов, подсчитанных по выражению (3.2), и определяет оптимальное число скважин.

При $n = \text{const}$ оптимальный диаметр скважины определяется из уравнения

$$\frac{df}{dD} = [1 + (n - 1)k_y] (c_2 + 2c_3 D) - \frac{5 \cdot 6,5 \alpha Q_{\text{св}}^2 Q_n \tau t}{n^2 \eta D^3} \tau t = 0. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) решается приближенно методом итерации. При этом оно записывается в виде $D = \varphi(D)$. Вид уравнения выбирается таким, чтобы $|\varphi'(D)| < q < 1$. Возможны две равносильные записи уравнения (3.5):

$$D_{\text{оп}} = -\frac{c_2}{2c_3} - \frac{32,5 \alpha Q_{\text{св}}^2 Q_n \tau t}{2c_3 n^2 \eta D^3 [1 + (n - 1)k_y]} \quad (3.6)$$

и

$$D_{\text{оп}} = \left(\frac{32,5 \alpha Q_{\text{св}}^2 Q_n \tau t}{n^2 [1 + (n - 1)k_y] \eta (c_2 + 2c_3 D)} \right)^{0,167} \quad (3.7)$$

Выбирается та из них, при которой процесс итерации сходится.

При оптимальных значениях $n_{\text{оп}}$ и $D_{\text{оп}}$ достаточные условия существования минимума функции в стационарной точке удовлетворяются.

В пункте 3.12 приведены численные примеры по определению оптимального числа (пример 1) и оптимального диаметра скважин (пример 2).

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ СКВАЖИНЫ НА ЛИНИИ СОСРЕДОТОЧЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ КОЛИЧЕСТВ ВОЗДУХА

Задача решается в два шага. На первом шаге определяется расход электроэнергии при заложении скважины, обеспечивающем равенство затрат энергии на продвижение дискретных количеств воздуха по обе стороны скважин.

На втором шаге определяется место заложения скважины, обеспечивающее минимальный суммарный расход электроэнергии на проветривание.

Первый шаг (I задача линейного программирования).

Функция цели

$$z_1 = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=1}^i Q_k \right)_i^3 + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=i+1}^n Q_k \right)_i^3 y_i \rightarrow \min. \quad (3.8)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=1}^i Q_k \right)_i^3 x_i - \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=i+1}^n Q_k \right)_i^3 y_i \\ x_i + y_i = R_i, \quad x_i, y_i \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, n-1, \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n — расходы воздуха, поступающего на линию сосредоточения слева направо, м³/с;

R_i — аэродинамическое сопротивление выработки между точками сосредоточения i -го и $i+1$ -го количества воздуха, кгс·с²/м⁶;

x_i, y_i — аэродинамические сопротивления отрезков i -й выработки (с общим сопротивлением R_i) соответственно от мест сосредоточения i -го и $i+1$ -го количества воздуха, кгс·с²/м⁶.

Второй шаг (II задача линейного программирования).

Функция цели

$$z_{II} = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=1}^i Q_k \right)_i^3 x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=i+1}^n Q_k \right)_i^3 y_i \rightarrow \min. \quad (3.10)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=1}^i Q_k \right)_i^3 x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=i+1}^n Q_k \right)_i^3 y_i < z_1 \\ x_i + y_i = R_i, \quad x_i, y_i \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, n-1, \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

где x_i, y_i — указанные выше аэродинамические сопротивления при втором шаге решения задачи.

Задача решается симплексным методом.

3.3 ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СКВАЖИНЫ НА ВЫРАБОТКЕ С НЕОДНОВРЕМЕННЫМ ПОСТУПЛЕНИЕМ ДИСКРЕТНЫХ КОЛИЧЕСТВ ВОЗДУХА

Рассматриваемая задача отличается тем, что на выработку в разных точках поступают со значительным смещением во времени дискретные количества воздуха. Продолжительность времени

поступления воздуха в каждую точку обычно в несколько раз меньше срока службы выработки.

Одним из конкретных условий задачи может быть выбор места заложения вентиляционной скважины для проветривания панели или блока. Рассмотрим уклонную панель, разрабатываемую л ярусами.

Исходящая струя из каждого яруса поступает на наклонный вентиляционный панельный ходок в точках 1, 2, ..., n.

Оптимальное место заложения скважины на ходке должно обеспечить минимальный расход электроэнергии на продвижение воздуха по этой выработке за весь срок ее службы.

Продолжительность периода поступления воздуха в точку равна сроку отработки соответствующего яруса. Пусть эти сроки соответственно будут t_1, t_2, \dots, t_n лет.

Принимаем, что в течение отработки одного яруса расход воздуха для проветривания остается неизменным, а при переходе на следующий ярус меняется.

При заложении вентиляционной скважины в точке m расход электроэнергии подсчитывается по формуле

$$\frac{24 \cdot 365}{102} \left[\sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{Q_{вi} Q_i^2}{\eta_i} t_i \sum_{k=1}^{m-1} R_k \right) - \sum_{i=m+1}^n \left(\frac{Q_{вi} Q_i^2}{\eta_i} t_i \sum_{k=m}^{i-1} R_k \right) \right], \quad (3.12)$$

где $Q_{вi}$ — производительность вентилятора в период отработки i -го яруса, м³/с;

Q_i — расход воздуха для проветривания i -го яруса, м³/с;

η_i — к. п. д. вентиляторной установки в период отработки i -го яруса;

R_i — аэродинамическое сопротивление участка панельного ходка, равного наклонной высоте i -го яруса, кгс · с²/м⁶.

Как видно из (3.12), величина расхода электроэнергии зависит от суммы, стоящей в квадратных скобках. Обозначив выражение в квадратных скобках через W_m , первую сумму в этих скобках $\sum W_{всв}$, вторую $\sum W_{пр}$, запишем

$$W_m = \sum W_{всв} + \sum W_{пр}. \quad (3.13)$$

При заложении вентиляционной скважины в точке $m+1$ расход электроэнергии будет

$$W_{m+1} = \sum W_{всв} + \left(\sum_{i=1}^{m-1} \frac{Q_{вi} Q_i^2}{\eta_i} t_i \right) R_m + \\ + \frac{Q_{вm} Q_m^2}{\eta_m} t_m R_m + \sum W_{пр} - \left(\sum_{i=m+1}^n \frac{Q_{вi} Q_i^2}{\eta_i} t_i \right) R_m. \quad (3.14)$$

При заложении скважины в точке $m-1$

$$W_{m-1} = \sum W_{m-1} - \left(\sum_{i=1}^{m-1} \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i \right) R_{m-1} + \sum W_{op} + \\ + \left(\sum_{i=m+1}^n \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i \right) R_{m-1} + \frac{Q_{om} Q_m^2}{\eta_m} l_m R_{m-1}. \quad (3.15)$$

Если точка m является точкой оптимального заложения скважины, то

$$\left. \begin{aligned} W_m &< W_{m+1}; \\ W_m &> W_{m-1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

После подстановки в неравенство (3.16) значений W_m , W_{m+1} и W_{m-1} из формул (3.13), (3.14), (3.15), сокращения равных членов по обе стороны неравенств и деления правой и левой частей неравенств соответственно на $R_m > 0$ и $R_{m+1} > 0$, получим следующую систему неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{m-1} \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i + \frac{Q_{om} Q_m^2}{\eta_m} l_m &> \sum_{i=m+1}^n \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i; \\ \sum_{i=m+1}^n \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i + \frac{Q_{om} Q_m^2}{\eta_m} l_m &> \sum_{i=1}^{m-1} \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i; \end{aligned} \right\} \quad (3.16')$$

Система неравенств (3.16) является аналитическим признаком выгоды заложения вентиляционной скважины в точке m .

Вентиляционную скважину выгодно заложить в точке m , в точке $m+1$ или в любой точке между ними, т. е. на отрезке $[m, m+1]$, если соблюдается равенство

$$\sum_{i=1}^{m-1} \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i + \frac{Q_{om} Q_m^2}{\eta_m} l_m = \sum_{i=m+1}^n \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i. \quad (3.17)$$

Вентиляционную скважину выгодно заложить на отрезке $[m-1, m]$, если будет соблюдаться равенство

$$\sum_{i=m+1}^n \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i + \frac{Q_{om} Q_m^2}{\eta_m} l_m = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{Q_{oi} Q_i^2}{\eta_i} l_i. \quad (3.18)$$

Если на выработку воздух поступает неодновременно по отдельным группам точек с одновременным поступлением в точки группы, место заложения скважины должно определяться в два этапа: на первом этапе определяются оптимальные точки заложения для точек с одновременным поступлением воздуха по праву Л. Д. Шевякова, на втором этапе определяется место зало-

жения скважины для найденных точек по группам как точек с неодновременным поступлением воздуха [используются критерии (3.16), (3.17), (3.18)].

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ УЧЕТЕ ЗАТРАТ

Сосредоточенные расходы воздуха Q_1, Q_2, \dots, Q_n неодновременно поступают в $1, 2, \dots, n$ точки (рис. 3.1).

При заложении вентиляционной скважины в точке m суммарные затраты на бурение скважины, поддержание вентиляционного хода и электроэнергию на продвижение воздуха по вентиляционному ходу и скважине могут быть подсчитаны по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 M_m = & \frac{24 \cdot 365}{102} \gamma \left[\sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{Q_{\text{вс}} Q_i^2}{\eta_i} l_i \sum_{k=i+1}^m R_k \right) + \right. \\
 & + \sum_{i=m+1}^n \left(\frac{Q_{\text{вс}} Q_i^2}{\eta_i} l_i \sum_{k=m}^{i-1} R_k \right) - R_{\text{свб}} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\text{вс}} Q_{\text{свб}}^2}{\eta_i} l_i \left. \right] + \\
 & + \left[H + \sum_{i=1}^m (l_i \sin \beta_i) \right] k + r \left[\sum_{i=1}^{m-1} \left(l_i \sum_{k=1}^i l_k \right) + \right. \\
 & \left. + \left(\sum_{i=m}^n l_i \right) \left(\sum_{i=1}^m l_i \right) \right]. \text{ руб.} \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

где $Q_{\text{вс}i}$ — расход воздуха по скважине в период отработки i -го яруса, м³/с;

l_i — срок службы i -го яруса, лет;

R_k — аэродинамическое сопротивление участка панельного хода, равного наклонной высоте k -го яруса, кгс·м²/м³;

H — расстояние от поверхности до верхней границы панели, м;

$R_{\text{свб}}$ — аэродинамическое сопротивление части скважины длиной, равной разности $L - H$ (где L — полная глубина скважины, м);

l_i — длина участка панельного хода на высоту i -го яруса, м;

β_i — средний угол наклона хода на участке i -го яруса, градус;

k — затраты на бурение 1 м вентиляционной скважины с учетом эффективности капиталовложений, руб.;

r — стоимость поддержания 1 м вентиляционного панельного хода в год, руб.

Обозначим произведения

$$\frac{Q_{a,i} Q_i^2}{\eta_i} l_i = P_i, \quad \frac{Q_{a,i} Q_{\text{св},i}^2}{\eta_i} l_i = F_i.$$

При заложении вентиляционной скважины в точке $m+1$ суммарные затраты подсчитываются по формуле

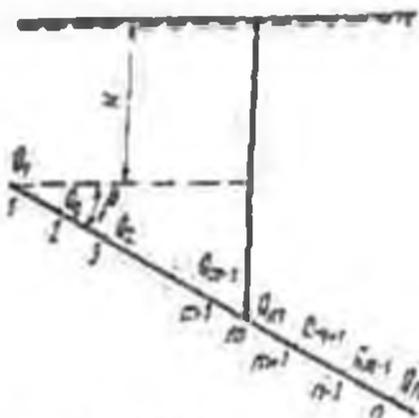


Рис. 2.1. Схема для определения оптимального места заложения скважины

$$M_{m+1} = M_m + 85,88\gamma \left[\left(\sum_{i=1}^{m-1} P_i \right) \times \right. \\ \times R_m + P_m R_m - \left(\sum_{i=m+1}^n P_i \right) \times \\ \times R_m + l_m \sin \beta_m R_{\text{св},0} \sum_{i=1}^n F_i \left. \right] + \\ + l_m \sin \beta_m k - r l_m \sum_{i=m+1}^n l_i. \quad (3.20)$$

При заложении вентиляционной скважины в точке $m-1$ суммарные затраты подсчитываются по формуле

$$M_{m-1} = M_m + 85,88\gamma \left[\left(\sum_{i=m+1}^n P_i \right) R_{m-1} + P_m R_{m-1} - \right. \\ \left. - \left(\sum_{i=1}^{m-1} P_i \right) R_{m-1} - l_{m-1} \sin \beta_{m-1} R_{\text{св},0} \sum_{i=1}^n F_i \right] - \\ - l_{m-1} \sin \beta_{m-1} k + r l_{m-1} \sum_{i=1}^m l_i. \quad \text{руб.} \quad (3.21)$$

Примем $R_{m,0} = R_{m-1,0} = R_0$.

Обозначив

$$G = \frac{k \sin \beta}{85,88\gamma R_0} + \frac{\sin \beta R_{\text{св},0}}{R_0} \sum_{i=1}^n F_i,$$

(где $R_{\text{св},0}$ — удельное сопротивление вентиляционной скважины) и

$$B = \frac{r}{85,88\gamma R_0},$$

получим следующую систему неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{m-1} P_i + G + P_m &> \sum_{i=m+1}^n P_i + B \sum_{i=m+1}^n l_i \\ \sum_{i=m+1}^n P_i + B \sum_{i=m+1}^n l_i + P_m &> \sum_{i=1}^{m-1} P_i + G \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Система неравенств (3.22) является аналитическим признаком оптимального заложения вентиляционной скважины в точке m .

Вентиляционную скважину выгодно заложить в любой точке отрезка $[m, m + 1]$, если соблюдается равенство

$$\sum_{i=1}^{m-1} P_i + G + P_m = \sum_{i=m+1}^n P_i + B \sum_{i=m+1}^n l_i \quad (3.23)$$

Вентиляционную скважину выгодно заложить в любой точке отрезка $[m - 1, m]$, если соблюдается равенство

$$\sum_{i=m+1}^n P_i + B \sum_{i=m}^n l_i + P_m = \sum_{i=1}^{m-1} P_i + G \quad (3.24)$$

3.8. ГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОВЫДАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Рассматривается случай проветривания шахты одним главным вентилятором, который переносится на скважину. При решении задачи необходимо обеспечить заданное распределение воздуха по выработкам сети. Ниже излагается методика нахождения места заложения вентиляционной скважины в разветвленной сети горных выработок.

1. Устанавливается направление, имеющее самую большую суммарную депрессию выработок (без учета регуляторов), т. е. направление максимальной депрессии.

2. Строится депрессиограмма направления максимальной депрессии между начальной и конечной точками разветвленной вентиляционной сети. На оси абсцисс откладывается в масштабе длина участков с постоянным расходом воздуха, на оси ординат — депрессия выработок направления максимальной депрессии. Правая граничная ордината депрессиограммы равна депрессии направления максимальной депрессии в пределах разветвленной части сети (до заложения вентиляционной скважины).

3. Определяется суммарная депрессия выработок направления, которая соединяется с направлением максимальной депрессии только в начальной и конечной точках разветвленной сети. При наличии нескольких направлений принимается депрессия направления, имеющего наибольшую суммарную депрессию горных выработок.

Величина депрессии отмечается точкой на правой граничной ординате депрессиограммы.

4. От найденной точки строится депрессиограмма направления максимальной депрессии при обратном движении воздуха. Расход воздуха по первой (от конечной точки разветвления) выработке этого направления равен расходу в конечной точке разветвления из выработок направления с депрессией, отмеченной точкой на правой ординате депрессиограммы. Расход воздуха по следующим

(в обратном направлении) выработкам направления максимальной депрессии возрастает за счет подхода воздуха из других направлений. Депрессиограмма обратного движения строится справа налево. Точка пересечения депрессиограммы прямого и обратного направлений определяет место заложения скважины. Место заложения скважины будет найдено окончательно, если точка пересечения депрессиограммы попала на первую выработку. Ордината точки пересечения дает значение депрессии разветвленной части сети после заложения скважины, абсцисса определяет место заложения скважины.

5. Если точка пересечения депрессиограммы соответствует второй, третьей и т. д. выработкам, то строятся дополнительные обратные депрессиограммы.

К каждой граничной точке выработки направления максимальной депрессии примыкает направление, начало которого следует принимать в начальной точке разветвленной части сети, а конец — в данной граничной точке. На ординатах граничных точек откладываются депрессии направлений и от этих точек строятся новые обратные депрессиограммы направления максимальной депрессии.

Если точка пересечения прямой депрессиограммы с первой депрессиограммой обратного движения воздуха будет на второй выработке, то строятся еще одна — вторая депрессиограмма обратного движения воздуха и, значит, будут две точки пересечения прямой депрессиограммы с двумя обратными.

Если точка пересечения прямой депрессиограммы с первой депрессиограммой обратного движения воздуха будет на третьей выработке, то строятся еще две — вторая и третья депрессиограммы обратного движения воздуха и, значит, будут три точки пересечения прямой депрессиограммы с тремя обратными и т. д.

Получив не одну, а несколько точек пересечения прямой депрессиограммы с обратными, за искомым следует принимать точку с наибольшей ординатой. Координаты этой точки определяют место заложения вентиляционной скважины и величину депрессии разветвленной части сети после заложения скважины.

При переносе вентилятора на скважину по ряду выработок воздух начинает проходить в обратном направлении, поэтому возникают ограничения в выборе места заложения скважины. Прежде всего место заложения скважины должно находиться на выработках вентиляционной сети.

Дополнительные условия выбора места для газовых шахт.

Режим проветривания шахты после заложения скважины должен быть в полном соответствии с рис. 136. В противном случае место заложения скважины должно быть на последней выработке цепи, где заложение скважины нежелательно.

Рассмотрим решение задачи для вентиляционной сети, изображенной на рис. 2.5. Начальная точка разветвления сети — 1, конечная — 6. Параметры сети до заложения вентиляционной скважины приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Участки и параметры сети (по рис. 3.1)	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	2-7	7-4	7-3
Q , м ³ /с	60,00	35,00	60,00	60,00	75,00	25,00	10,00	15,00
R , кгс·с ² /м ⁶	0,01	0,05	0,015	0,02	0,009	0,04	0,04	0,09
h , кгс/см ²	36,00	61,25	37,50	72,00	50,62	25,00	40,00	20,25
l , м	1000	200,00	1000	800,00	600,00	—	—	—

Участки и параметры сети (по рис. 3.1)	1-1	1-8	7-8-10	9-8-10	10-6	1-1
Q , м ³ /с	40,00	25,00	15,0	10,0	25,0	15,0
R , кгс·с ² /м ⁶	0,03	0,05	0,2	0,2	0,1	0,4
h , кгс/см ²	48,00	31,25	45,00	20,0	62,5	90,0
l , м	—	—	—	—	—	—

Суммарные депрессии выработок по направлениям 1-2-3-4-5-6 = 257,37; 1-8-9-8-10-6 = 186,75; 1-8-9-8-10-6 = 161,75; 1-8-5-6 = 188,62; 1-2-7-4-5-6 = 223,62; 1-2-7-3-4-5-6 = 241,37 кгс/см².

Как видно, максимальную депрессию имеет направление 1-2-3-4-5-6.

На рис. 3.2 строим депрессиограмму этого направления. Ломаная линия 1-2-3-4-5-6 показывает изменение депрессии направления максимальной депрессии по длине выработок. Не имеют общих выработок с направлением максимальной депрессии два направления: 1-8-9-8-10-6 и 1-8-9-8-10-6. Большую депрессию имеет первая из них. На крайней правой ординате депрессиограммы откладываем депрессию направления 1-8-9-8-10-6 = 186,75 кгс/м² — АА'. Из точки А' строим депрессиограмму обратного направления движения воздуха.

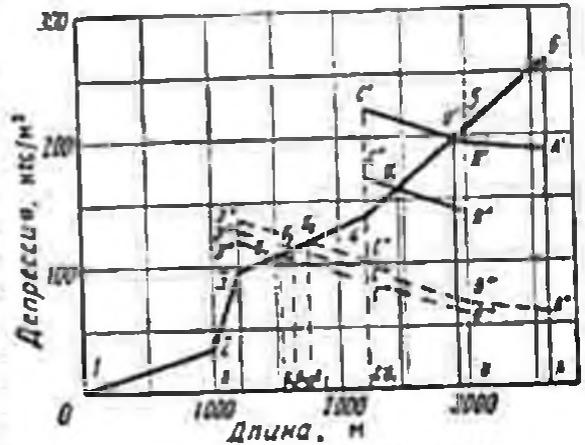


Рис. 3.2. Графическое решение задачи

Необходимые расчетные данные приведены в табл. 3.2. Линия А'В' показывает изменение депрессии выработки 6-5 при движении воздуха, притекающего в точку 6 по выработке 10-6 ($Q_{10-6} = 25$ м³/с), линия В'С' — изменение депрессии выработки 5-4 при движении указанного расхода воздуха в сумме с расходом воздуха, притекающего в точку 5 по выработке 8-5 ($Q_{10-6} + Q_{8-5} = 25 + 15 = 40$ м³/с). Так как обратная депрес-

Таблица 3.2

Направление	Депрессия напряжения	Депрессия участков (см рис. 2.8), кгс/м ²		
		4-3	5-4	4-3
1-8-9-а-10-б	186,75	5,62	32	32,5
1-8-5	138,00	—	32	32,5

стиграмма пересекла прямую, то дальнейшее ее построение можно прекратить. Точка пересечения депрессиограмм O^1 лежит на выработке 5-4, т. е. за точкой 5 (в направлении 6-5-4), в которую подходит воздух по направлению 8-5, поэтому строим еще одну обратную депрессиограмму для направления 1-8-5. Для этого на ординате точки 5 откладываем депрессию $h_{1-8-5} = 138 \text{ кгс/м}^2$ (отрезок BB^{11}) и от точки B^{11} строим линию изменения депрессии выработки 5-4 (при обратном движении воздуха). Получим точку пересечения прямой депрессиограммы со второй обратной через направление 1-8-5 — O^1 . Так как ордината точки O^1 меньше ординаты точки O^2 , то место заложения скважины определяет точка O^1 . Ее проекция на ось абсцисс указывает местоположение скважины на выработке 4-5.

По рис. 3.2 (учитывая масштаб) определяем, что вентиляционную скважину (в условиях примера) следует закладывать на расстоянии 680 м от точки 4. При заложении скважины переходим от сети с одним направлением максимальной депрессии 1-2-3-4-5-6 к сети с двумя направлениями, равной максимальной депрессии 1-2-3-4-0 и 1-8-9-б-10-6-5-0. Депрессия разветвленной части сети снижается с 257,37 до 196 кгс/м².

Решим пример с изменением некоторых условий. Будем считать суммарную депрессию выработок по направлению 1-8-9-б-10-6 равной 60 кгс/м² (депрессия выработок направления 1-8-9-а-10-б меньше 60 кгс/м²), депрессия выработок струн 1-8-5 равна 56 кгс/м².

Прямая депрессиограмма не меняется.

Строим обратные депрессиограммы для двух направлений. На рис. 3.2 эти депрессиограммы показаны штриховыми линиями. Обратные депрессиограммы получают по новому дополнительному звену $C^{III}D^{III}$ и $C^{IV}D^{IV}$. Для первого направления обратная депрессиограмма — $A^{III}B^{III}C^{III}D^{III}$, для второго — $B^{IV}C^{IV}D^{IV}$. Так как линия $A^{III}B^{III}C^{III}D^{III}$ пересекла прямую депрессиограмму на выработке 3-4, то необходимо построить еще одну обратную депрессиограмму от направления 1-2-7-4. Она представлена на рис. 3.2 линией C^VD^V . Три обратные депрессиограммы дают три точки пересечения с прямой депрессиограммой — O^1 , O^2 , O^3 .

Наибольшую ординату имеет точка O^3 . Ее проекция на ось абсцисс O_3 и определяет искомое место заложения вентиляционной

скважины. Вентиляционная скважина должна быть заложена на выработке 3—4, на расстоянии 540 м от точки 3.

Депрессия шахты снизилась с 257,37 до 117 кгс/м², т. е. более чем в 2 раза. Уменьшается расход энергии, улучшается эффективность проветривания шахты.

Для сети, имеющей неразветвленную часть, примыкающую к вентилятору, расположение вентиляционной скважины в разветвленной сети решает также задачу исключения неразветвленной ее части.

Графический способ определения места заложения скважины в разветвленной вентиляционной сети отличается большой наглядностью и может быть рекомендован для практического использования при относительно несложных вентиляционных сетях.

3.6. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОВЫДАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Решение задачи начинается с нахождения направления максимальной депрессии в сети и направления с наибольшей депрессией горных выработок среди примыкающих к направлению максимальной депрессии в конечной точке разветвления сети.

Критерием оптимальности места заложения скважины является минимальная депрессия разветвленной части вентиляционной сети, что достигается уравнением депрессий указанных направлений. Чем больше направление максимальной депрессии по величине депрессии будет отличаться от депрессии других направлений, тем более выгодно станет перемещение вентиляционной скважины из конечной точки разветвления сети на одну из выработок направления максимальной депрессии.

Найденная точка заложения скважины должна проверяться по направлениям, примыкающим к направлению максимальной депрессии. Аналитический способ определения места заложения вентиляционной скважины в разветвленной сети заключается в последовательном определении возможных точек заложения на выработках направления максимальной депрессии, начиная от конечной точки разветвления сети, и проверки расчетных точек, не являются ли они искомыми.

Рассмотрим предлагаемую методику в привязке к схеме вентиляционных соединений на рис. 2.5. Пусть максимальной депрессию будет иметь направление 1—2—3—4—5—6—11 с депрессией h_1 . Среди направлений, примыкающих к направлению максимальной депрессии в конечной точке разветвления 6, наибольшую депрессию имеет направление 1—8—9—6—10—6 с депрессией h_2 . Тогда расстояние от точки 6 до возможного места заложения скважины на выработке 5—6 будет

$$x_1 = \frac{h_1 - h_2}{R_{15,0}(Q_{15}^2 + Q_{61}^2)}, \quad (3.25)$$

где $R_{12,0}$ — удельное аэродинамическое сопротивление выработки 5—6, кгс·с²/м⁶;

Q_{11} , Q_{12} — расход воздуха по выработкам 5—6 и 10—6 до заложения скважины, м³/с.

Индексы параметров записываются по положению выработки в сети: первый индекс — порядковый номер направления слева направо, второй — номер выработки в данном направлении по ходу вентиляционной струи.

Если $x_1 < l_{11}$ (длина выработки 5—6), то x_1 и будет расстоянием от точки 6 до искомой точки заложения вентиляционной скважины на выработке 5—6. В противном случае скважину закладывать на этой выработке нецелесообразно.

Расстояние возможного места заложения вентиляционной скважины на выработке 4—5 от точки 5 будет

$$x_{21} = \frac{h_1 - h_5 - h_{15} - R_{15}Q_{64}^2}{R_{11,0}[Q_{11}^2 + (Q_{61} + Q_{12})^2]}, \text{ м.} \quad (3.26)$$

где h_{15} — депрессия выработки 5—6, кгс/м²;

R_{15} — аэродинамическое сопротивление выработки 5—6, кгс·с²/м⁶;

$R_{12,1}$ — удельное аэродинамическое сопротивление выработки 4—5, кгс·с²/м⁶;

Q_{11} , Q_{12} — расходы воздуха по выработкам 4—5 и 8—5, м³/с.

Полученная точка проверяется по направлению 1—8—5—4. Расстояние второй возможной точки заложения скважины до точки 5 будет

$$x_{22} = \frac{h_1 - h_4}{R_{11,0}[Q_{11}^2 + (Q_{61} + Q_{12})^2]}, \text{ м.} \quad (3.27)$$

где h_4 — депрессия направления 1—8—5—6 кгс/м². Возможен случай, когда $h_1 - h_4 = 0$. Это определяет место заложения скважины в точке 5.

Окончательно расстояние места заложения скважины на выработке 4—5 до точки 5 будет $x_2 = \min\{x_{21}, x_{22}\}$, если $x_2 < l_{11}$ (здесь l_{11} — длина выработки 4—5). В противном случае определяются точки возможного места заложения на выработке 3—4. Расстояние этих точек до точки 4 (x_{23} , x_{24} , x_{25}) будет:

$$x_{24} = \frac{h_1 - h_2 - h_{11} - h_{14} - R_{15}Q_{64}^2 - R_{11}(Q_{61} + Q_{12})^2}{R_{13,0}[Q_{13}^2 + (Q_{61} + Q_{13} + Q_{23})^2]}, \quad (3.28)$$

$$x_{25} = \frac{h_1 - h_1 - h_{11} - R_{15}(Q_{61} + Q_{12})^2}{R_{13,0}[Q_{13}^2 + (Q_{61} + Q_{13} + Q_{23})^2]}, \quad (3.29)$$

$$x_{23} = \frac{h_1 - h_2}{R_{12,0}[Q_{12}^2 + (Q_{12} + Q_{13} + Q_{23})^2]}, \quad (3.30)$$

где $h_{3,4}$ — депрессия выработки 4—5, кгс/м²;

h_2 — депрессия направления 1—2—7—4—5—6;

$R_{12,0}$ — удельное сопротивление выработки 3—4, кгс·с²/м³;

$R_{3,4}$ — аэродинамическое сопротивление выработки 4—5, кгс·с²/м³;

Q_{12} , Q_{20} — расходы воздуха по выработкам 3—4 и 7—4, м³/с.

Искомое место заложения скважины на выработке 3—4 будет находиться от точки 4 на расстоянии $x_1 = \min \{x_{21}, x_{22}, x_{23}\} < l_{12}$ (здесь l_{12} — длина выработки 3—4). Если $x_1 > l_{12}$, решение задачи продолжается. Как сказано выше, существует технологический предел — вентиляционная скважина закладывается только на выработках вентиляционного горизонта.

При решении задачи принято, что удельное аэродинамическое сопротивление выработок, на которых определяется место заложения скважины, остается постоянным по длине выработки. В противном случае задача решается (по той же методике) с выделением каждого участка с постоянным удельным сопротивлением.

Задача рассмотрена при фиксированных значениях аэродинамического сопротивления выработок. Обычно длина выработок и их аэродинамическое сопротивление непрерывно меняются. Время существования заданной схемы вентиляционных соединений может удлиняться путем приведения всех производных схем к опорной заменой последующих разветвлений сети эквивалентными одиночными выработками.

Решение задачи начинается с нахождения оптимального интервала, по которому перемещается точка уравнивания депрессий. Граничные точки оптимального участка определяются по вышеизложенной методике для сети с фиксированными сопротивлениями: первая точка — для сети в начальный период, вторая точка — в конечный.

Критерием оптимальности места заложения скважины является минимальный перерасход электроэнергии по сравнению с условным случаем, когда место заложения скважины перемещается по оптимальному интервалу и все время сохраняется равенство депрессий двух направлений. Выбором точки заложения скважины на оптимальном интервале нарушается равенство депрессий двух направлений. Первоначально большие депрессия одного направления (в течение времени перемещения оптимальной точки от одной граничной точки до точки заложения), затем депрессии становятся равными (когда перемещающаяся оптимальная точка совпадает с местом заложения скважины) и затем больше становится депрессия второго направления.

Предположим для начала, что оптимальный отрезок $[a_1, b_1]$ располагается на выработке 5—6 (см. рис. 2.5) (a_1 — начальная, b_1 — конечная точки отрезка). Примем расположение точек и расстояния между ними, как показано на рис. 3.3, а. Длина оптимального участка L_{12} . Срок службы схемы T лет. Обозначим

депрессии направлений 1-2-3-4-5-6 и 1-8-9-б-10-6 к концу срока существования схемы h_{1a} и h_{1b} .

Будем искать расстояние места заложения вентиляционной скважины O_1 от граничной точки оптимального отрезка b_1 . Средняя скорость перемещения оптимальной точки от начальной точки a_1 до конечной b_1 оптимального отрезка

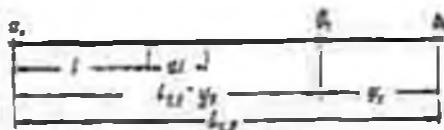
$$v = \frac{L_{1a}}{T}$$

Так как расстояние от места заложения скважины до движущейся оптимальной точки изменяется, то для определения перерасхода электроэнергии (при движении оптимальной точки от a_1



Рис. 3.3. Расположение точек и расстояния между ними при определении места заложения скважины

Рис. 3.4. Схема для определения перерасхода электроэнергии на интервале



до точки O_1) возьмем на расстоянии l от точки a_1 элементарную динку оптимального интервала dl (рис. 3.4). Тогда элементарный перерасход электроэнергии для левой части оптимального интервала будет

$$dM_1 = R_{1a,0} dQ_{1a}^2 Q_{01} F_1 \frac{(L_{1a} - y_1) - l}{v} \quad (3.31)$$

где $Q_{01} = k_1 (Q_{1a} + Q_{0a})$ — производительность вентилятора на скважине, m^3/c (где k_1 — коэффициент внешних утечек воздуха);

$F_1 = \frac{24 \cdot 365}{100 \eta_1}$ (где η_1 — к. п. д. вентиляторной установки).

Перерасход электроэнергии на указанном участке

$$M_{1a} = \frac{R_{1a,0} Q_{1a}^2 Q_{01} F_1}{v} \int_0^{L_{1a} - y_1} [(L_{1a} - y_1) - l] dl = \\ = R_{1a,0} Q_{1a}^2 Q_{01} F_1 \frac{(L_{1a} - y_1)^2}{2v} \quad (3.32)$$

Наиболее выгодное место заложения вентиляционной скважины в точке O_1 (при расположении оптимального интервала на выработке 5—6) должно обеспечить минимальный перерасход электроэнергии, выраженной суммой

$$M_{15} = R_{15,0} \frac{(L_{11} - y_1)^2}{2\alpha} Q_{11}^2 Q_{01} F_1 + R_{15,0} \frac{y_1^2}{2} Q_{01}^2 Q_{01} F_1. \quad (3.33)$$

Чтобы найти значение y_1 , обеспечивающее минимальное значение функции (3.33), т. е. $M_{15} = \min$, находим производную функции и приравняем ее нулю $\frac{dM_{15}}{dy_1} = 0$.

Из полученного уравнения определяем

$$y_1 = \frac{L_{11} Q_{11}^2}{Q_{11}^2 + Q_{01}^2}, \text{ м} \quad (3.34)$$

Вид формулы не изменится, если поменяются местами граничные точки a_1 и b_1 , но расстояние y_1 определяется от второй граничной точки (по ходу вентиляционной струи).

Если оптимальный интервал будет располагаться на выработке 4—5 и расстояние между точками такое, как принято на рис. 3.3, б, то

$$y_1 = \frac{L_{11} Q_{11}^2}{Q_{11}^2 + (Q_{01} + Q_{02})^2}, \text{ м} \quad (3.35)$$

Для выработки 3—4 (рис. 3.3, в)

$$y_1 = \frac{L_{11} Q_{11}^2}{Q_{11}^2 + (Q_{01} + Q_{02} + Q_{03})^2}, \text{ м} \quad (3.36)$$

и т. д.

Формулы (3.34), (3.35), (3.36) имеют общую структуру. Это дробь, в числителе которой произведение длины оптимального интервала на квадрат расхода воздуха, подходящего к точке заложения скважины по ходу струи, в знаменателе — сумма квадратов расходов воздуха, подходящего к точке заложения с двух сторон.

Более сложным является случай, когда между начальной и конечной точками оптимального интервала находится одна и более точек разветвления сети. Эти точки являются точками разрыва функций, описывающих перерасход электроэнергии. Значения функции находятся в подынтервалах непрерывности: между точками разрыва или между точкой разрыва и граничной точкой оптимального интервала.

Находятся возможные положения скважины на всех участках непрерывности и из искомого принимается точка, обеспечивающая наименьший перерасход электроэнергии для всего оптимального участка. При наличии n точек разрыва определяется $n + 1$ возможных мест заложения вентиляционной скважины.

При одной точке разрыва и расположении точек (рис. 3.3, *г*) на отрезке $|a_1, b_1|$ находятся два возможных места заложения скважины: O_1 — между точками S и b_1 и O_2 — между точками a_1 и S .

Для точки O_1 перерасход электроэнергии запишется:

$$M_{10} = R_{11,0} \frac{(x_{20} - l_{11})^2}{2v} Q_{11}^2 Q_{02} F_2 + R_{11,0} \frac{(l_{11} - x_{10k} - y_{1a})^2}{2v} \times \\ \times Q_{11}^2 Q_{02} F_2 + R_{11,0} \frac{y_{1a}^2}{2v} Q_{04}^2 Q_{02} F_2. \quad (3.37)$$

Отсюда значение y_{1a} , обеспечивающее минимальное значение функции M_{10} (3.37), будет

$$y_{1a} = \frac{(l_{11} - x_{10k}) Q_{11}^2}{Q_{11}^2 + Q_{04}^2}, \text{ м.} \quad (3.38)$$

Запишем выражение перерасхода электроэнергии для заложения скважины в точке O_2 (рис. 3.3, *г*)

$$M_{11} = R_{11,0} \frac{(l_{11} - x_{10k})^2}{2v} Q_{04}^2 Q_{02} F_2 + \\ + R_{11,0} \frac{(x_{20} - l_{11} - y_{2a})^2}{2v} (Q_{04} + Q_{02})^2 Q_{02} F_2 + R_{11,0} \frac{y_{2a}^2}{2v} Q_{11}^2 Q_{02} F_2. \quad (3.39)$$

В формулах (3.37) и (3.38) $Q_{02} = k_2 (Q_{11} + Q_{04}) = k_2 (Q_{04} + Q_{02} + Q_{11})$ — производительность вентилятора, м³/с; k_2 — коэффициент внешних утечек воздуха.

Из выражения (3.38) значение y_{2a} , обеспечивающее минимальное значение функции M_{11} , будет

$$y_{2a} = \frac{(x_{20} - l_{11}) (Q_{04} + Q_{02})^2}{(Q_{04} + Q_{02})^2 + Q_{11}^2}, \text{ м.} \quad (3.40)$$

Формулы (3.38) и (3.40) имеют общий принцип построения. Для нахождения расстояния возможного места заложения скважины от ближайшей граничной точки используют дробь, в числителе которой произведение расстояния этой граничной точки оптимального интервала для точки разветвления на квадрат расхода воздуха, проходящего от точки разветвления к точке возможного места заложения скважины, в знаменателе — сумма квадратов расходов воздуха, подходящих к точке возможного места заложения скважины с двух сторон. Чтобы выбрать из двух точек O_1 и O_2 такую, которая обеспечивает минимальный перерасход, необходимо найти значение M_{10} по (3.37), подставив найденное значение y_{1a} по (3.38) и M_{11} по (3.39) и значение y_{2a} по (3.40).

Если $M_{10} < M_{11}$, то искомой точкой места заложения скважины будет точка O_1 ; если $M_{11} < M_{10}$, то O_2 .

Рассмотрим случай, когда на оптимальном отрезке располагаются две точки разветвления вентиляционной сети (точки разрыва функции). Оптимальный отрезок располагается на выработках 3—4—5—6. Расположение точек и расстояния между ними видно из рис. 3.3, д.

При заложении вентиляционной скважины в точке O_1 перерасход электроэнергии определяется функцией

$$\begin{aligned}
 M_{13} = & R_{13,0} \frac{(x_{130} - (l_{11} + l_{12}))^2}{2v} Q_{13}^2 Q_{03} F_3 + \\
 & + R_{11,0} \frac{l_{11}^2}{2v} Q_{11}^2 Q_{03} F_3 + R_{12,0} \frac{(l_{12} - x_{130} - y_{13})^2}{2v} Q_{12}^2 Q_{03} F_3 + \\
 & + R_{14,0} \frac{y_{13}^2}{2v} Q_{04}^2 Q_{03} F_3. \quad (3.41)
 \end{aligned}$$

Отсюда расстояние y_{13} , обеспечивающее минимальное значение функции M_{13} , будет

$$y_{13} = \frac{(l_{12} - x_{130}) Q_{12}^2}{Q_{13}^2 + Q_{04}^2}. \quad (3.42)$$

При заложении вентиляционной скважины в точке O_2 перерасход электроэнергии определяется функцией

$$\begin{aligned}
 M_{14} = & R_{13,0} \frac{(x_{130} - (l_{11} + l_{12}))^2}{2v} Q_{13}^2 Q_{03} F_3 + \\
 & + R_{11,0} \frac{(l_{11} - y_{14})^2}{2v} Q_{11}^2 Q_{03} F_3 + R_{11,0} \frac{y_{14}^2}{2v} (Q_{04} + Q_{02})^2 Q_{03} F_3 + \\
 & + R_{12,0} \frac{(l_{12} - x_{130})^2}{2v} Q_{12}^2 Q_{03} F_3. \quad (3.43)
 \end{aligned}$$

Отсюда расстояние y_{14} , обеспечивающее минимальное значение функции M_{14} (3.43), будет

$$y_{14} = \frac{l_{11} Q_{11}^2}{Q_{11}^2 + (Q_{04} + Q_{02})^2}. \quad (3.44)$$

При заложении скважины в точке O_3 перерасход электроэнергии определяется функцией

$$\begin{aligned}
 M_{15} = & R_{13,0} \frac{y_{15}^2}{2v} Q_{13}^2 Q_{03} F_3 + R_{13,0} \times \\
 & \times \frac{(x_{130} - (l_{11} + l_{12}) - y_{15})^2}{2v} (Q_{04} + Q_{02} + Q_{03})^2 Q_{03} F_3 + \\
 & + R_{11,0} \frac{l_{11}^2}{2v} (Q_{04} + Q_{02})^2 Q_{03} F_3 + R_{12,0} \frac{(l_{12} - x_{130})^2}{2v} Q_{12}^2 Q_{03} F_3. \quad (3.45)
 \end{aligned}$$

Расстояние y_{21} , обеспечивающее минимальное значение функции M_{11} (3.45).

$$y_{21} = \frac{l_{21} - (l_{11} + l_{12})(Q_{01} + Q_{02} + Q_{03})^2}{Q_{11}^2 + (Q_{01} + Q_{02} + Q_{03})^2} \quad (3.46)$$

В формулах (3.47), (3.49) и (3.51) $Q_{02} = k_2(Q_{12} + Q_{02}) = k_2(Q_{12} + Q_{01} + Q_{02}) = k_2(Q_{12} + Q_{01} + Q_{02} + Q_{03})$ — производительность вентилятора; k_2 — коэффициент внешних утечек воздуха.

Формулы определения расстояний возможных мест заложения до граничных точек (3.42), (3.44) и (3.46) строятся по такому же принципу, как и при нахождении одной точки разветвления на оптимальном отрезке, т. е. как и формулы (3.38) и (3.40) только в числителе берется расход воздуха, подходящий от ближайшей граничной точки оптимального отрезка.

Расстояние возможного места заложения скважины между двумя точками разветвления сети на оптимальном отрезке от второй точки разветвления (по ходу вентиляционной струи) находится путем деления произведения расстояния между двумя точками разветвления и квадрата расхода воздуха по этой выработке на сумму квадратов расходов воздуха, подходящего с двух сторон к возможной точке заложения скважины.

Чтобы найти наимыгоднейшее место заложения скважины, сравниваются значения функций перерасхода электроэнергии M_{11} , M_{12} и M_{13} по формулам (3.45), (3.43) и (3.41) с подстановкой в них соответственно значений y_{21} , y_{22} и y_{13} по формулам (3.46), (3.44) и (3.42), т. е. находится

$$M = \min \{M_{11}, M_{12}, M_{13}\}.$$

Так как каждой функции (M_{11} , M_{12} , M_{13}) соответствует точка заложения (O_1 , O_2 , O_3), то искомой будет точка, соответствующая минимальному значению функции. Аналогично находится точка заложения вентиляционной скважины при определении на оптимальном интервале трех и более точек разветвления.

В пункте 3.12 (пример 3) приведено численное решение задачи по определению оптимального места заложения скважины аналитическим способом.

3.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОВЫДАЮЩИХ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Задача решается при заданном распределении воздуха.

Запишем математическую модель задачи в общем виде при фиксированных аэродинамических сопротивлениях горных выработок.

Функция цели

$$z_n = W_n + \sum_{i=1}^m R_{i,0} \alpha x_i Q_i^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,1} \alpha x_{m+i} Q_{m+i}^2 \rightarrow \min. \quad (3.47)$$

Система ограничений:

$$h_n + \sum_{i=1}^m R_{i,0} \alpha x_i Q_i^2 = h_{11} + \sum_{i=1}^m R_{i,1} \alpha x_{m+i} Q_{m+i}^2 \quad (3.48)$$

$$x_i + x_{m+i} = l_i; \quad x_i, x_{i+1} \geq 0;$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где $R_{i,0}$ — удельное аэродинамическое сопротивление i -й выработки направления максимальной депрессии ($i = 1, 2, \dots, m$), на которой возможно заложение вентиляционной скважины, кгс·с²/м⁶,

$R_{i,1}$, l_i — аэродинамическое сопротивление, кгс·с²/м⁶, и длина i -й выработки, м;

x_i — расстояние от граничной точки выработки до места заложения скважины: при $i = 1, 2, \dots, m$ от начальной точки по ходу струи, при $m+1, m+2, \dots, 2m$ — от конечной точки, м;

Q_i — расход воздуха по i -й выработке: при $i = 1, 2, \dots, m$ — по направлению движения воздуха до заложения скважины, при $i = m+1, m+2, \dots, 2m$ — в обратном направлении, м³/с;

W_n , h_n — суммарные расход энергии и депрессия от начальной точки разветвления сети до первой выработки, на которой возможно заложение скважины по направлению максимальной депрессии;

h_{11} — суммарная депрессия выработок направления с наибольшей депрессией среди прилегающих к направлению максимальной депрессии в конечной точке разветвления сети.

Функции цели (3.47) определяют расход электроэнергии на продвижение воздушной струи по выработкам направления максимальной депрессии, где возможно заложение скважины. Эти выработки определяются по технологическим соображениям, в частности, это могут быть только выработки вентиляционного горизонта.

Первое ограничение систем (3.48) исходит из того положения, что максимальное снижение депрессии сети возможно при уравнении депрессии двух направлений — с максимальной депрессией и второй по величине депрессией.

Задача решается симплексным методом.

Рассмотрим случай, когда аэродинамические сопротивления горных выработок изменяются с течением времени. Для упрощения решения задачи принимаем постоянным темп изменений аэродинамических сопротивлений выработок.

Место расположения скважины определяется на выработках, которые выделены в течение рассматриваемого периода в составе планируемой максимальной депрессии.

Функция цели в общем виде запишется

$$z = \sum_{i=1}^m R_{i0} \left(x_i + \frac{\Delta l_i}{2} \right) Q_i^2 + \sum_{i=1}^m R_{i1} \left(x_{m+1} + \frac{\Delta l_i}{2} \right) Q_{m+1}^2 \rightarrow \min, \quad (3.49)$$

где $\Delta l_i = \left| \frac{l_{i2} - l_{i1}}{2} \right|$; l_{i1} , l_{i2} — конечная и начальная длина i -й выработки.

По отношению к точке, уравнивающей депрессию двух направлений при минимальной длине выработок (в частном случае в начальный момент расчетного периода), можно записать уравнение

$$h_{i0} + \sum_{i=1}^m R_{i0} x_i Q_i^2 - x_{2m+1} = h_{i1} + \sum_{i=1}^m R_{i1} x_{m+1} Q_{m+1}^2 + x_{2m+2} \quad (3.50)$$

Для точки, уравнивающей депрессию при минимальной длине выработок, можно записать

$$h_{i0} + \sum_{i=1}^m R_{i0} k_i x_i Q_i^2 + x_{2m+3} = h_{i1} + \sum_{i=1}^m R_{i1} k_i x_{m+1} Q_{m+1}^2 - x_{2m+4} \quad (3.51)$$

где $k_i = \frac{l_{i2}}{l_{i1}}$ — отношение длины i -й выработки в начальный и конечный моменты расчетного периода;

Q_{i0} , Q_{i1} — расходы воздуха по i -й выработке в начальный и конечный моменты расчетного периода, м³/с.

Принимая $x_{2m+1} = x_{2m+2}$, $x_{2m+3} = x_{2m+4}$, а следовательно, $x_{2m+2} + x_{2m+4} = x_{2m+3} + x_{2m+4} + x_{2m+5}$, получим систему ограничений:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{i=1}^m R_{i0} x_i (Q_{i0}^2 + k_i Q_{i1}^2) - \\ & - \sum_{i=1}^m R_{i1} x_{m+1} (Q_{m+1}^2 + k_i Q_{m+1}^2) = \\ & = h_{i10} + h_{i12} - h_{i02} - h_{i04}; \\ & x_i + x_{2m+5} = l_{i2}, \quad x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 2m. \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

Задача решается симплексным методом.

В пункте 3.12 (пример 4) приведен численное решение задачи по определению места заложения воздуховыдающей скважины с применением методов линейного программирования при фиксированных и изменяющихся аэродинамических сопротивлениях горных выработок.

Решение задачи определения места заложения скважины с применением линейного программирования может быть целесообразным для относительно сложных вентиляционных сетей. Для решения задачи может использоваться ЭВМ.

3.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОВЫДАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕНТИЛЯТОРА

Одновременно с определением места заложения воздуховыдающей скважины определяется величина увеличения расхода воздуха, проходящего по выработкам направления максимальной депрессии, на величину ΔQ за счет снижения депрессии сети при перемещении вентилятора главного проветривания. Место заложения скважины выбирается на выработках направления максимальной депрессии. Для построения минимизируемой функции опишем кривую мощность вентилятора эмпирической формулой вида

$$W = a_1 + a_2 h + a_3 h^2, \quad (3.53)$$

где a_1, a_2, a_3 — постоянные коэффициенты эмпирической формулы.

Депрессия вентилятора h может быть записана через сумму депрессий выработки направления максимальной депрессии

$$h = \sum_{i=1}^n R_{n,i} (Q_{n,i} + \Delta Q)^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_i (Q_i + \Delta Q)^2 + \\ + \sum_{i=1}^m R_{i,0} (l_i - x_i) Q_{n+i}^2 + R_{св,в} (Q_m + Q_{2m} + \Delta Q)^2 + \\ + R_{в,в} (Q_m + Q_{2m} + Q_{в,г} + \Delta Q)^2, \quad (3.54)$$

где x_i — расстояние возможного места заложения скважины от начальной точки на i -й выработке;

$R_{n,i}, Q_{n,i}$ — относятся к i -й выработке, расположенной между начальной точкой разветвления сети и начальной точкой первой выработки, на которой возможно заложение скважины;

$R_{св,в}, R_{в,в}$ — аэродинамические сопротивления скважки в канале вентилятора, кгс·с²/м⁴;

$Q_{в,г}$ — величина внешних утечек воздуха, м³/с.

Уравнения связи могут быть записаны:

$$\sum_{i=1}^n R_{n,i} (Q_{n,i} + \Delta Q)^2 + \sum_{i=1}^n R_{i,0} x_i (Q_i + \Delta Q)^2 = h_{11} + \sum_{i=1}^n R_{i,0} (l_i - x_i) Q_{n+1,i}^2 \quad (3.55)$$

$$\sum_{i=1}^n R_{n,i} (Q_{n,i} + \Delta Q)^2 + \sum_{i=1}^n R_{i,0} x_i (Q_i + \Delta Q)^2 + R_{n,n} (Q_n + Q_{2n} + \Delta Q)^2 + R_{n,0} (Q_n + Q_{2n} + Q_{0,yr} + \Delta Q)^2 = b_0 - b_1 (Q_n + Q_{2n} + Q_{0,yr} + \Delta Q)^2 \quad (3.56)$$

Расход воздуха по каналу вентилятора и скважине принят $Q_n + Q_{2n} = \text{const}$, так как эта величина не зависит от места заложения скважины. При переходе от выработки к выработке уменьшение расхода воздуха, поступающего от начальной точки, всегда равно увеличению расхода воздуха, поступающего от конечной точки.

Для решения задачи используется метод Лагранжа. Составляется вспомогательная функция и находится абсолютный минимум этой функции.

Достаточные условия существования минимума функции (3.53) следуют из закона минимальной мощности при распределении воздуха в сети.

3.9 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОПОДАЮЩИХ СКВАЖИН

С помощью воздухоподающих скважин возможно снижение общешахтной депрессии до любой величины, вплоть до величины депрессии направления с минимальной депрессией. В последнем случае скважины бурятся на выработки всех направлений, кроме последней с наименьшей величиной депрессии. С помощью скважины, пробуренной в одной точке, можно сравнить депрессии двух направлений — с максимальной депрессией и второй по величине депрессией.

Определение места заложения скважины, уравнивающей депрессии двух направлений. Примем порядковый номер индексов депрессии направлений от точки поступления воздуха в сеть до конечной точки разветвления сети в порядке уменьшения величины депрессии, т. е.

$$h_1 > h_2 > \dots > h_n \quad (3.57)$$

где h_1 — депрессия направления максимальной депрессии, кгс/м².

Одна скважина (группа скважин в одном месте) позволяет снизить депрессию на величину

$$h_2 < h_1 - h_2 \quad (3.58)$$

Определяются возможные места заложения скважины на выработках направления максимальной депрессии, начиная от начальной точки разветвления выработок двух направлений с депрессией h_1 и h_2 . Примем, что эта точка совпадает с начальной точкой разветвления сети. Расстояние от начальной точки k -й выработки до возможного места заложения скважины обозначим через x_2 . Определяя последовательно эти расстояния для выработок направления максимальной депрессии, начиная с зеркала, производят сравнение его с длиной выработки l_2 . Если $x_2 > l_2$, решение задачи продолжается. Найденное расстояние x_2 становится искомым, если $x_2 < l_2$.

Для горизонтальных выработок длина скважины не зависит от места заложения, т. е. $R_{сва} = \text{const}$ для всех точек возможного места заложения.

Если выработка наклонна, то

$$R_{сва} = R_{сва 2} = R_{сва 0} x_2 \sin \alpha_2, \quad (3.59)$$

где $R_{сва k}$ — аэродинамическое сопротивление скважины при заложении в k -й точке подвода количества воздуха, кгс·с²/м³;

$R_{сва 0}$ — удельное аэродинамическое сопротивление скважины, кгс·с²/м³;

α_2 — угол наклона выработки между точками k и $k+1$, градус.

Знак плюс принимается, если воздух движется по наклонной выработке сверху вниз, знак минус — если воздух движется по выработке снизу вверх.

Определим возможное место заложения для первой выработки. В этом случае можно записать систему двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (R_{сва 1} \pm R_{сва 1, 0} x_1 \sin \alpha_1) Q_{сва 1}^2 + \\ + \frac{R_{11}}{l_{11}} (l_{11} - x_1) Q_{11}^2 + h_1 - R_{11} Q_{11}^2 = h_1 - h_2; \\ (R_{сва 1} \pm R_{сва 1, 0} x_1 \sin \alpha_1) Q_{сва 1}^2 = \\ = R_{об} (Q_{об} - Q_{сва 1})^2 + \frac{R_{11}}{l_{11}} x_1 (Q_{11} - Q_{сва 1})^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.60)$$

Из первого уравнения системы

$$x_1 = \frac{R_{сва} Q_{сва 1}^2 + h_2}{R_{11, 0} Q_{11}^2 - (\pm R_{сва 1, 0} \sin \alpha_1 Q_{сва 1}^2)}, \quad (3.61)$$

где $R_{об}$, $Q_{об}$ — аэродинамическое сопротивление общих выработок (до начальной точки разветвления) и расход воздуха по ним,

$R_{11, 0} = \frac{R_{11}}{l_{11}}$ — удельное аэродинамическое сопротивление первой выработки направления максимальной депрессии, кгс·с²/м³.

Индексы указывают на порядковый номер направления и порядковый номер выработки в направлении.

В отдельных случаях скважина может буриться и на выработки до разветвления, если они имеют большую длину и горизонтальны или наклонны.

Расход воздуха $Q_{\text{св}i,1}$ по скважине при расположении ее на первой выработке является корнем уравнения 4-й степени следующего вида:

$$A_1 Q_{\text{св}i,1}^4 + 2B_1 Q_{\text{св}i,1}^3 + C_1 Q_{\text{св}i,1}^2 - 2D_1 Q_{\text{св}i,1} + E_1 = 0, \quad (3.62)$$

где

$$A_1 = R_{11,0} R_{\text{св}i,1} - (\pm R_{00} R_{\text{св}i,0} \sin \alpha_1);$$

$$B_1 = R_{11,0} R_{\text{св}i,1} Q_{11} - (\pm R_{00} R_{\text{св}i,0} \sin \alpha_1 Q_{00});$$

$$C_1 = R_{00} h_{11,0} - R_{11,0} h_c - (\pm R_{\text{св}i,0} \sin \alpha_1) (h_{00} + h_c);$$

$$D_1 = R_{00} Q_{00} h_{11,0} + R_{11,0} Q_{11} h_c;$$

$$E_1 = h_{00} h_{11,0} + h_{11,0} h_c.$$

где $h_{11,0}$ — удельная депрессия первой выработки.

Для решения уравнения (3.62) целесообразно использовать один из методов приближенного решения уравнений, в частности метод Ньютона.

Найденное значение $Q_{\text{св}i}$ подставляется в формулу (3.61), по которой определяется значение x_1 . Расстояние определяет положение точки заложения скважины на первой выработке.

Если $x_1 < l_{11}$, то найденное место точки и будет искомым. В противном случае, т. е. если $x_1 > l_{11}$, находим возможное место заложения скважины на второй выработке. Расстояние места заложения от начальной точки выработки обозначается через x_2 .

Составим систему из двух уравнений, аналогичную системе (3.60):

$$\left. \begin{aligned} & (R_{\text{св}i,2} \pm R_{\text{св}i,0} x_2 \sin \alpha_2) Q_{\text{св}i,2}^2 + \\ & + \frac{R_{12}}{l_{12}} (l_{12} - x_2) Q_{12}^2 + h_1 - R_{12} Q_{12}^2 - h_{11} = h_1 - h_c; \\ & (R_{\text{св}i,2} \pm R_{\text{св}i,0} x_2 \sin \alpha_2) Q_{\text{св}i,2}^2 = \\ & = R_{00} (Q_{00} - Q_{\text{св}i,2})^2 + R_{11} (Q_{11} - Q_{\text{св}i,2})^2 + \\ & + \frac{R_{12}}{l_{12}} x_2 (Q_{12} - Q_{\text{св}i,2})^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.63)$$

Из первого уравнения

$$x_2 = \frac{R_{\text{св}i,2} Q_{\text{св}i,2}^2 + h_c - h_{11}}{R_{12,0} Q_{12}^2 - (\pm R_{\text{св}i,0} \sin \alpha_2 Q_{\text{св}i,2})}, \quad (3.64)$$

где

$$R_{12,0} = \frac{R_{12}}{l_{12}}.$$

Расход воздуха по скважине $Q_{\text{сва}1}$ определится из уравнения

$$A_2 Q_{\text{сва}2}^4 - 2B_2 Q_{\text{сва}2}^3 + C_2 Q_{\text{сва}2}^2 - 2D_2 Q_{\text{сва}2} + E_2 = 0. \quad (3.65)$$

где

$$A_2 = R_{12,0} R_{\text{сва}2} - (\pm R_{00} R_{\text{сва}2,0} \sin \alpha_2) - (\pm R_{11} R_{\text{сва}2,0} \sin \alpha_2);$$

$$B_2 = R_{12,0} R_{\text{сва}2} Q_{12} - (\pm R_{00} R_{\text{сва}2,0} \sin \alpha_2 Q_{00}) - \\ - (\pm R_{11} R_{\text{сва}2,0} \sin \alpha_2 Q_{11});$$

$$C_2 = (R_{00} + R_{11}) h_{12,0} + R_{12,0} (h_c^* - h_{11}) - \\ - (\pm R_{00} R_{\text{сва}2,0} \sin \alpha_2 Q_{00}^2) - (\pm R_{11} R_{\text{сва}2,0} \sin \alpha_2 Q_{11}^2) - \\ - (\pm (h_c^* - h_{11}) R_{\text{сва}2,0} \sin \alpha_2);$$

$$D_2 = (R_{00} Q_{00} + R_{11} Q_{11}) h_{12,0} + R_{12,0} Q_{12} (h_c^* - h_{11});$$

$$E_2 = h_{12,0} (h_{00} + h_c^*).$$

Решив уравнение (3.65), находим расход воздуха по скважине при заложении ее на второй выработке. Подставив это значение в формулу (3.64), находим значение x_2 , определяющее положение точки заложения Q_2 на второй выработке.

Если $x_2 < l_{12}$, то найденная точка и будет искомым местом заложения скважины. Если $x_2 > l_{12}$, то находится возможное место заложения скважины на третьей выработке и т. д.

На базе математической индукции мы можем для k -й выработки найти возможное место заложения скважины, вернее, его расстояние x_k от точки k по формуле

$$x_k = \frac{R_{\text{сва}k} Q_{\text{сва}k}^3 + h_c^* - \sum_{i=1}^{k-1} h_{1i}}{R_{1k,0} Q_{1k}^3 - (\pm R_{\text{сва}k,0} \sin \alpha_k Q_{\text{сва}k}^2)}. \quad (3.66)$$

При этом расход воздуха по скважине $Q_{\text{сва}k}$ является корнем уравнения

$$A_k Q_{\text{сва}k}^4 - 2B_k Q_{\text{сва}k}^3 + C_k Q_{\text{сва}k}^2 - 2D_k Q_{\text{сва}k} + E_k = 0. \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned}
 A_2 &= R_{12,0} R_{c22,0} - \left[= \left(R_{10,0} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{1i} \right) R_{c22,0} \sin \alpha_2 \right]; \\
 B_2 &= R_{12,0} Q_{12} R_{c22,0} - \left[= \left(R_{10,0} Q_{10} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{1i} Q_{1i} \right) R_{c22,0} \sin \alpha_2 \right]; \\
 C_2 &= h_{12,0} \left(R_{10,0} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{1i} \right) + R_{12,0} \left(h_i - \sum_{i=1}^{k-1} h_{1i} \right) - \\
 &\quad - \left[= \left(h_{10,0} + \sum_{i=1}^{k-1} h_{1i} \right) R_{c22,0} \sin \alpha_2 \right]; \\
 D_2 &= h_{12,0} \left(R_{10,0} Q_{10} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{1i} Q_{1i} \right) + \\
 &\quad + R_{12,0} Q_{12} \left(h_i - \sum_{i=1}^{k-1} h_{1i} \right); \\
 E_2 &= h_{12,0} (h_{10,0} + h_i).
 \end{aligned}$$

Решение задачи продолжается до тех пор, пока возможное место заложения скважины не будет в пределах выработки, на которой оно определяется. Может быть случай, когда искомое снижение депрессии не может быть получено за счет расположения принятой воздухоподводящей скважины (группы скважин) на выработках по свежей струе. Тогда можно уменьшить аэродинамическое сопротивление скважины (группы) увеличением диаметра скважины или числа скважин в группе и решение по описанной методике повторить.

2. Определение места заложения скважин на выработках двух и более направлений. С помощью воздухоподводящих скважин могут уравниваться депрессии трех и более направлений. С помощью двух скважин (или двух групп скважин) можно снизить депрессию сети на величину

$$h_i^* < h_1 - h_2 \quad (3.68)$$

где h_2 — третья по величине депрессия направления в вентиляционной сети

Первая скважина должна снизить депрессию направления максимальной депрессии на величину h_i^* . Для чего место заложения скважины на выработках этого направления должно выбираться таким образом, чтобы депрессия его стала равной $h_1 - h_i^*$. Вторая скважина должна снижать депрессию направления со второй по величине депрессией на $h_2 - (h_1 - h_i^*)$. Место заложения скважины на выработках этого направления должно выбираться таким образом, чтобы депрессия его стала равной (так же как и депрессия первого направления) $h_1 - h_i^*$.

В общем случае с помощью j скважин (или j групп скважин) можно снизить депрессию сети на величину

$$h_c^j = h_1 - h_j, \quad (3.69)$$

где h_j — j -я по величине депрессия направления в вентиляционной сети.

Тогда $j - 1$ скважин ($j - 1$ групп скважин) закладываются на выработках $j - 1$ направлений. Места заложения скважин должны выбираться таким образом, чтобы депрессии 1, 2, ..., ..., $j - 1$ направлений стали равными $h_1 - h_c^j$.

Место заложения скважины на каждом направлении находится путем определения возможных мест заложения на каждой выработке, начиная от начальной точки разветвления сети, и проверки, не являются ли возможные точки искомыми. Для этого используются формулы, которые в общем виде могут быть записаны:

$$x_{jk} = \frac{R_{cxb, jk} Q_{cxb, jk}^2 + h_c^j - \sum_{i=1}^{k-1} h_{ji}}{R_{jk, o} Q_{jk}^2 - (\approx R_{cxb, jk, o} \sin \alpha_{jk} Q_{cxb, jk}^2)}; \quad (3.70)$$

$$A_{jk} Q_{cxb, jk}^4 - 2B_{jk} Q_{cxb, jk}^3 + C_{jk} Q_{cxb, jk}^2 - 2D_{jk} Q_{cxb, jk} + E_{jk} = 0, \quad (3.71)$$

где

$$A_{jk} = R_{jk, o} R_{cxb, jk} - \left[\approx \left(R_{oos} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{ji} \right) R_{cxb, jk, o} \sin \alpha_{jk} \right];$$

$$B_{jk} = R_{jk, o} Q_{jk} R_{cxb, jk} - \left[\approx \left(R_{oos} Q_{oos} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{ji} Q_{ji} \right) R_{cxb, jk, o} \sin \alpha_{jk} \right];$$

$$C_{jk} = h_{jk, o} \left(R_{oos} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{ji} \right) + R_{jk, o} \left(h_c^j - \sum_{i=1}^{k-1} h_{ji} \right) - \left[\approx \left(h_{oos} + \sum_{i=1}^{k-1} h_{ji} \right) R_{cxb, jk, o} \sin \alpha_{jk} \right];$$

$$D_{jk} = h_{jk, o} \left(R_{oos} Q_{oos} + \sum_{i=1}^{k-1} R_{ji} Q_{ji} \right) + R_{jk, o} Q_{jk} \left(h_c^j - \sum_{i=1}^{k-1} h_{ji} \right);$$

$$E_{jk} = h_{jk, o} (h_{oos} + h_c^j).$$

В пункте 3.12 (пример 5) приведен численный пример по определению места заложения воздухоподающих скважин.

3. Определение места заложения воздухоподающей скважины при изменяющемся возросшим сопротивлением разветвленной сети. На рис. 3.5 приведен график возможных случаев изменения депрессий двух направлений с наибольшей депрессией в сети.

Предполагается, что направление максимальной депрессии сохраняется в течение всего рассматриваемого периода. Депрессия этого направления в случае отсутствия воздухоподающей скважины показана двойной линией. Штриховой линией показано изменение перепада давления направления со второй по величине депрессией

На рис. 3.5, а линиями $B_1^I B_2^I$ и $B_1^{II} B_2^{II}$ показаны случаи, когда депрессия возрастает. Только в первом случае скорость роста пе-

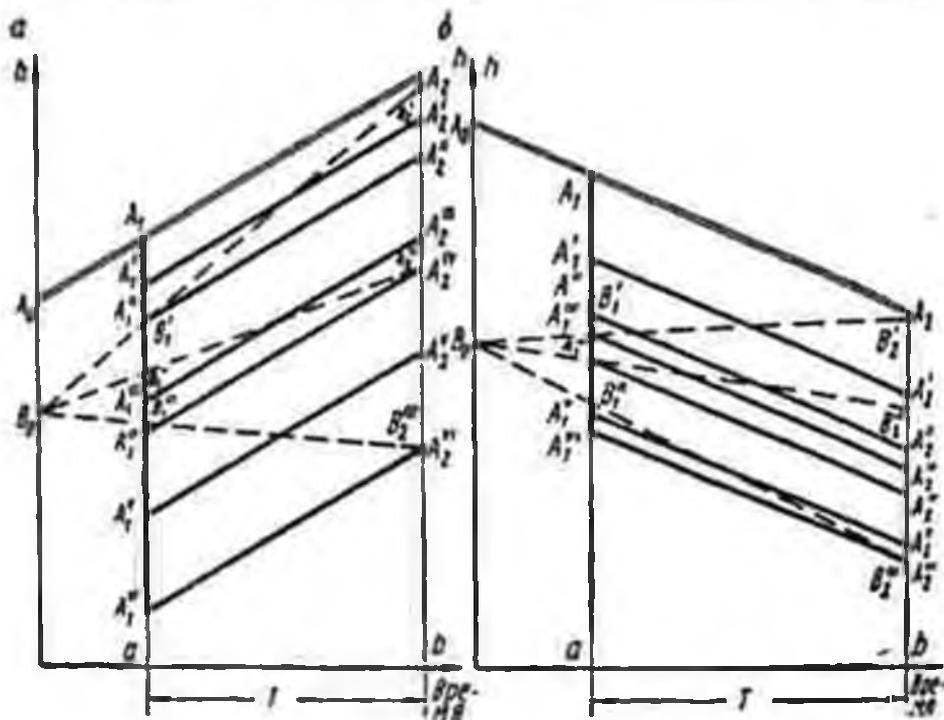


Рис. 3.5. Графики возможных случаев изменения депрессии двух направлений с максимальной депрессией:

а — перепад давления направления максимальной депрессии с течением времени возрастает, б — перепад давления направления максимальной депрессии с течением времени уменьшается

репада давления этого направления больше скорости роста перепада давления направления максимальной депрессии. Линией $B_1^{III} B_2^{III}$ показан случай, когда депрессия второго направления уменьшается. Линиями $A_1^I A_1^I, A_1^{III} A_1^{III}, A_2^I A_2^I$ показано изменение перепада давления направления максимальной депрессии при закрытии скважины в точке, обеспечивающей уравнение перепада давлений двух направлений в середине расчетного периода

На рис. 3.5, б линией $B_1^I B_2^I$ показан случай, когда депрессия второго направления возрастает. Линиями $B_1^{II} B_2^{II}$ и $B_1^{III} B_2^{III}$ показаны случаи, когда депрессии второго направления с течением времени уменьшаются, только во втором случае скорость уменьшения перепада давления больше, чем скорость уменьшения перепада давления направления максимальной депрессии.

Одинарной сплошной линией показано изменение перепада давления направления максимальной депрессии в случае заложения скважины на выработке этого направления.

Однако, как видно из рис. 3.5, депрессия сети в любой момент рассматриваемого периода, а значит, и расход электроэнергии будут меньше, если с помощью воздухоподающей скважины снизить перепад давления направления максимальной депрессии до величины, меньшей депрессии второго направления, т. е. на расчетный период поменять местами направления по величине депрессии — сделать с максимальным перепадом давления второе направление. Это возможно, если с помощью воздухоподающей скважины уравнивать депрессии на моменты начала или конца расчетного периода.

Здесь возможны следующие случаи.

При возрастании перепада давления направления максимальной депрессии уравнивать депрессию в начальный момент расчетного периода (точка *a*) следует, если депрессия второго направления изменяется по линии $B_1^I B_2^I$; уравнивать депрессию в конечный момент расчетного периода, если депрессия второго направления изменяется по линиям $B_1^I B_2^I$ или $B_1^{III} B_2^{III}$. При уменьшении перепада давления направления максимальной депрессии уравнивать депрессию в начальный момент расчетного периода следует, если депрессия второго направления изменяется по линиям $B_1^I B_2^I$ или $B_1^{III} B_2^{III}$; уравнивать депрессию в конечный момент расчетного периода, если депрессия второго направления изменяется по линии $B_1^{III} B_2^{III}$.

В зависимости от того, какой из случаев применим к поставленной задаче, максимальное снижение депрессии сети h_c^I определяется по одной из формул:

$$\begin{aligned} h_c^I &= h_{1a} - h_{2a}, \\ h_c^I &= h_{1k} - h_{2k}, \end{aligned} \quad (3.72)$$

где h_{1a} , h_{2a} , h_{1k} , h_{2k} — перепады давлений двух направлений с наибольшей депрессией в начальный и конечный моменты расчетного периода.

3.10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОПОДАЮЩИХ СКВАЖИН С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

При фиксированных расходах воздуха по горным выработкам сети можно выбрать такое место заложения воздухоподающей скважины, буримой на выработку направления максимальной депрессии, при котором по скважине будет поступать заданное количество воздуха. Задача решается с применением методов линейного программирования.

Запишем математическую модель задачи в общем виде.
Функция цели

$$z = W_0 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} \sigma_i Q_i^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,m+1} (Q_i + Q_{св})^2 + \sum_{i=1}^p R_{s,i} (Q_{s,i} + Q_{св})^2 \rightarrow \min. \quad (3.73)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} R_{св} Q_{св}^2 &= h_0 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} \sigma_i Q_i^2 \\ h_0 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} \sigma_i Q_i^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,m+1} (Q_i + Q_{св})^2 + \\ &+ \sum_{i=1}^p R_{s,i} (Q_{s,i} + Q_{св})^2 \geq h_{1j}; \\ x_i + x_{m,i} &= l_i; \quad x_i, x_{m,i} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \right\} \quad (3.74)$$

где $R_{s,i}$, $Q_{s,i}$ — гидродинамическое сопротивление и расход воздуха по j -й ($j = 1, 2, \dots, p$) выработке направления максимальной депрессии, расположенной за выработками, где возможно заложение скважины.

Из p выработок этой группы q выработок входит в разветвленную часть сети

Первое ограничение системы (3.74) отражает равенство депрессий: скважины и суммарной депрессии выработок от точки поступления воздуха в сеть до точки пересечения со скважиной.

Второе ограничение обуславливает решение задачи, при котором перепад давления направления максимальной депрессии до конечной точки разветвления не должен стать меньше перепада давления направления со второй по величине депрессией, т. е. предусматривается максимально возможное снижение депрессии сети.

В связи с этим система уравнений может стать несовместной, тогда заданное количество воздуха по скважине поступить не может. Поставленная задача линейного программирования решается симплексным методом.

2.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ ВОЗДУХОПОДАЮЩИХ СКВАЖИН, РАСХОДА ВОЗДУХА ПО СКВАЖИНЕ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕНТИЛЯТОРА

При использовании метода множителей Лагранжа одновременно с определением оптимального места заложения скважины может определяться оптимальный расход воздуха по скважине

($Q_{\text{св}}$) и увеличение количества воздуха по выработкам направле-
ния максимальной депрессии за счет уменьшения сопротивления
сети с помощью скважины (ΔQ).

Минимизируемая функция, как и для воздухоподогреющей сква-
жины, составляется путем описания кривой мощности вентилятора

$$\begin{aligned}
 W = a_0 + a_1 \left[R_{\text{св}} Q_{\text{св}}^2 + \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (Q_i + \Delta Q)^2 + \right. \\
 \left. + \sum_{i=1}^p R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} + \Delta Q)^2 \right] + a_2 \left[R_{\text{св}} Q_{\text{св}}^2 + \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (Q_i + \Delta Q)^2 + \right. \\
 \left. + \sum_{i=1}^p R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} + \Delta Q)^2 \right]^2. \quad (3.75)
 \end{aligned}$$

Уравнения связи:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{св}} Q_{\text{св}}^2 = \sum_{i=1}^n R_{\text{в} i} (Q_i - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2 + \\
 + \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (l_i - x_i) (Q_i - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2. \quad (3.76)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2 + \\
 + \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (l_i - x_i) (Q_i - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2 + x_i (Q_i + \Delta Q)^2 + \\
 + \sum_{i=1}^p R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} + \Delta Q)^2 = b_0 + b_2 (Q_p + \Delta Q)^2. \quad (3.77)
 \end{aligned}$$

Введем вспомогательную функцию

$$\begin{aligned}
 F = a_0 + a_1 \left[R_{\text{св}} Q_{\text{св}}^2 + \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (Q_i + \Delta Q)^2 + \right. \\
 \left. + \sum_{i=1}^p R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} + \Delta Q)^2 \right] + a_2 \left[R_{\text{св}} Q_{\text{св}}^2 + \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (Q_i + \Delta Q)^2 + \right. \\
 \left. + \sum_{i=1}^p R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} + \Delta Q)^2 \right]^2 + \lambda_1 \left[R_{\text{св}} Q_{\text{св}}^2 - \sum_{i=1}^n R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2 - \right. \\
 \left. - \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (l_i - x_i) (Q_i - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2 \right] + \\
 + \lambda_2 \left\{ \sum_{i=1}^n R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2 + \right. \\
 \left. + \sum_{i=1}^m R_{i, \text{от} i} (l_i - x_i) (Q_i - Q_{\text{св}} + \Delta Q)^2 + x_i (Q_i + \Delta Q)^2 + \right. \\
 \left. + \sum_{i=1}^p R_{\text{в} i} (Q_{\text{в} i} + \Delta Q)^2 - b_0 + b_2 (Q_p + \Delta Q)^2 \right\}.
 \end{aligned}$$

Переменные x_i ($i = 1, 2, \dots, m$), $Q_{\text{св}}$, ΔQ , а также множитель Лагранжа λ_1, λ_2 определяются из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} f_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ f_{i+2} = \frac{\partial F}{\partial Q_{\text{св}}} = 0, \quad f_{i+3} = \frac{\partial F}{\partial (\Delta Q)} = 0; \\ f_{i+2+j} = \frac{\partial F}{\partial \lambda_j} = 0, \quad j = 1, 2. \end{aligned} \right\} \quad (3.78)$$

Система уравнений (3.78) решается методом линеаризации. Невязки функций по уравнениям при k -м приближении находятся из уравнений

$$\begin{aligned} f_n(x_{i,k}, Q_{\text{св},k}, \Delta Q_k, \lambda_{j,k}) = \Delta U_{n,k}, \quad (3.79) \\ n = 1, 2, \dots, m + 4. \end{aligned}$$

Невязки по переменным при k -м приближении определяются из системы уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_i} \right)_k \Delta x_{i,k} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial Q_{\text{св}}} \right)_k \Delta Q_{\text{св},k} + \\ + \left(\frac{\partial f_n}{\partial (\Delta Q)} \right)_k \Delta (\Delta Q)_k + \sum_{j=1}^2 \left(\frac{\partial f_n}{\partial \lambda_j} \right)_k \Delta \lambda_{j,k} = 0, \quad (3.80) \\ n = 1, 2, \dots, m + 4; \\ i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2. \end{aligned}$$

Значения переменных при $k + 1$ приближении определяются:

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} + \Delta x_{i,k}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (3.81)$$

$$Q_{\text{св},k+1} = Q_{\text{св},k} + \Delta Q_{\text{св},k}; \quad (3.82)$$

$$\Delta Q_{k+1} = \Delta Q_k + \Delta (\Delta Q)_k; \quad (3.83)$$

$$\lambda_{j,k+1} = \lambda_{j,k} + \Delta \lambda_{j,k}; \quad j = 1, 2. \quad (3.84)$$

При одновременном определении места заложения скважины, расхода воздуха по ней и увеличения расхода воздуха по варианту возмещения максимальной депрессии достаточные условия существования минимума функции (3.75) следуют из физической сущности задачи.

3.12. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Определить оптимальное число скважин в группе при диаметре $D = 1$ м и следующих условиях: $\alpha = 0,0003$, $k_{\text{св}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$, $Q_{\text{св}} = 125$ м³/с, $t = 10$ лет, $\gamma = 0,009$ руб., $\eta = 0,9$, $c_1 = 1311$, $c_2 = -262$, $k_{\gamma} = 0,9$.

Оптимальное число скважин определяется из выражения

$$n_{\text{оп}} = \left[1116,44 \frac{\alpha Q_{\text{сва}}^2 Q_p \gamma}{\eta D^3 (c_1 + c_2 D + c_3 D^2) k_y} \right]^{0,333} = 20,74^{0,333};$$

$$\lg n_{\text{оп}} = 0,333 \lg 20,74 = 0,43850;$$

$$n_{\text{оп}} = 2,75 \approx 3.$$

Для данных условий оптимальное число скважин в группе 3.

Пример 2. Определить оптимальный диаметр скважин при следующих условиях: $n = 1$ м, $k_y = 0,90$, $c_1 = 1311$, $c_2 = -262$, $Q_{\text{сва}} = 30$ м³/с, $Q_p = 35$ м³/с, $t = 10$ лет, $\alpha = 0,0003$, $\gamma = 0,009$ руб., $\eta = 0,5$.

Оптимальный диаметр скважины определяется из выражения

$$D_{\text{оп}} = \left(\frac{A}{c_1 + 2c_2 D} \right)^{0,167}$$

где

$$A = 2791,1 \frac{\alpha Q_{\text{сва}}^2 Q_p \gamma}{\eta n^2 [1 + (n-1) k_y]}$$

Уравнение (3.7) решается методом итераций. Тогда $A = 4754,66$.

В качестве первого приближения принимаем $D_1 = 2$ м, тогда

$$\lg D_{\text{оп}} = 0,167 (\lg 4754,66 - \lg |1311 + 2(-262) 2|) = 0,21022;$$

$$D_2 = 1,6 \text{ м.}$$

Дальнейшая последовательность приближений приведена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

$D_{\text{оп}, i}$	$-2c_2 D_{\text{оп}, i}$	$1311 -$ $-2c_2 D_{\text{оп}, i}$	$\lg \quad $	$\lg 4754,66$	$\lg D_{\text{оп}, i+1}$	$D_{\text{оп}, i+1}$
1,6	-838,4	472,0	2,67449	3,67712	0,16744	1,5
1,5	-786	525	2,72016	3,67712	0,15981	1,4
1,4	-733,6	577,4	2,76148	3,67712	0,15291	1,4

Итак, оптимальным для условий примера будет диаметр $D_{\text{оп}} = 1,4$ м.

Пример 3. Определить место заложения воздухоподогревающей скважины аналитическим способом при изменяющихся аэродинамических сопротивлениях выработок за время 5 лет. Пример решается для вентиляционной сети, приведенной на рис. 2.5.

Условия примера приведены в табл. 3.4.

Депрессии направлений в начальный период (при нумерации слева направо) равны (в кгс/м²): $h_{a1} = 219,62$, $h_{a2} = 195,87$, $h_{a3} = 185,62$, $h_{a4} = 107,62$, $h_{a5} = 151,75$, $h_{a6} = 175,5$.

Участки сети (рис. 3.5)

Параметры	Участки сети (рис. 3.5)													
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12			
Q, м³/с	60	35	50	60	75	25	10	15	40	25	15	10	25	15
R, кгг/м² м³	0,01 0,01	0,04 0,02	0,012 0,015	0,015 0,02	0,009 0,009	0,006 0,04	0,04 0,4	0,04 0,4	0,03 0,03	0,06 0,05	0,15 0,2	0,1 0,2	0,1 0,1	0,15 0,2
h, кгг/м³	36,00 30,00	69,00 61,25	30,00 37,50	54,00 72,00	50,62 60,72	5,00 25,00	4,00 40,00	20,25 20,25	48,00 48,00	31,25 31,25	32,75 45,00	10,00 20,00	62,50 62,50	9,00 90,00
l, м	1000 1000	160 200	800 1000	600 800	600 600	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Для Q моменты приведены в течение расчетного периода, для остальных параметров в часовой — за сутки.

Возможное место заложения скважины в начальный период на выработке 5—6, определенное по формуле (3.25), находится на расстоянии 470,6 м от точки 6. Так как $470,6 < 600$ м, то эта точка и будет искомым местом заложения скважины в начальный период, т.е. первой граничной точкой оптимального интервала. Депрессии направленной в конечный период будут $h_{1,1} = 257,37$, $h_{2,2} = 241,37$, $h_{3,3} = 223,62$, $h_{4,4} = 188,62$, $h_{5,5} = 161,75$, $h_{6,6} = 166,75$ кгг/м³.

Возможное место заложения на выработке 5—6: $x_1 = 753$ м.

Так как $753 > 600$ м, то определяется возможное место заложения скважины на выработке 4—5 по формулам (3.26) и (3.27): $x_{2,2} = 110,6$ м, $x_{3,3} = 528$ м.

Так как $110,6 < 800$ м, то искомым местом заложения скважины в конечный период будет находиться на расстоянии 110,6 м от точки 5.

Расположение оптимального интервала показано на рис. 3.3, т.е. $x_{1,1} = 470,6$ м, $x_{2,2} = 710,6$ м; $L_{1,1,2} = 240$ м.

Найдем возможные места заложения скважины на интервалах [5, 6] и [6, 5] по формулам (3.38) и (3.40). $h_{1,1} = 116,7$ м; $h_{2,2} = 34$ м.

Найдем величину перерасхода электроэнергии

по формулам (3.37) и (3.39): $M_{11} = 156\ 860$; $v = 48$; $F_1 = 171,76$; $M_{11} = 98\ 165$.

Так как $M_{11} < M_{12}$, то искомая точка заложения скважины будет на выработке 4—5 (между точками a_4 и 5) на расстоянии 34 м от точки a_4 или на расстоянии 76,7 м от точки 5.

Пример 4. Определить место заложения воздуховывлающей скважины с использованием методов линейного программирования.

Запишем математическую модель для схемы, приведенной на рис. 2.5. Интервалы соответствуют нумерации выработок на рисунке.

Пусть максимальную депрессию имеет направление 1—2—3—4—5—6.

Функция цели

$$z = R_{12}Q_{12}^2 + R_{23}x_1Q_{23}^2 + R_{34}x_2Q_{34}^2 + R_{45}x_3Q_{45}^2 + R_{56}x_4Q_{56}^2 + R_{24}x_1Q_{24}^2 + R_{25}x_2Q_{25}^2 + R_{35}x_3Q_{35}^2 + R_{46}x_4Q_{46}^2 + R_{16}x_1Q_{16}^2 \rightarrow \min. \quad (3.85)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} R_{12}Q_{12}^2 + R_{23}x_1Q_{23}^2 + R_{34}x_2Q_{34}^2 + R_{45}x_3Q_{45}^2 + R_{56}x_4Q_{56}^2 + R_{24}x_1Q_{24}^2 + R_{25}x_2Q_{25}^2 + R_{35}x_3Q_{35}^2 + R_{46}x_4Q_{46}^2 + R_{16}x_1Q_{16}^2 \\ x_1 + x_2 = l_{12}; \\ x_2 + x_3 = l_{23}; \\ x_3 + x_4 = l_{34}; \\ x_4 + x_5 = l_{45}; \\ x_i \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, 8. \end{aligned} \right\} \quad (3.86)$$

Примем численные значения параметров, приведенные в табл. 3.4. Они соответствуют схеме вентиляционных соединений на рис. 2.5.

По данным табл. 3.4 депрессии направлений на конечный момент расчетного периода будут (в кгс/м²):

$$h_{1-2-3-4-5-6} = 257,37, \quad h_{1-2-3-4-5-6-7} = 161,75, \\ h_{1-2-3-4} = 188,62, \quad h_{1-2-3-4-5} = 223,62, \\ h_{1-2-3-4-5-6} = 241,37, \quad h_{1-2-3-4-5-6-7} = 186,75.$$

Направление максимальной депрессии 1—2—3—4—5—6.

Подставим значения параметров из табл. 3.4.

Получим функцию цели

$$z = 10,72x_1 + 1,875x_2 + 5,4x_3 + 6,328x_4 + 68,656x_5 + 1,875x_6 + 1,60x_7 + 0,234x_8 + 2160 \rightarrow \min \quad (3.87)$$

в систему ограничений

$$\begin{aligned}
 &0,306x_1 + 0,038x_2 + 0,09x_3 + 0,084x_4 - 0,038x_5 - \\
 &\quad - 0,04x_7 - 0,009x_8 = 150,75; \\
 &x_1 \quad \quad \quad + x_2 \quad \quad \quad = 200; \\
 &\quad \quad x_3 \quad \quad \quad + x_4 \quad \quad \quad = 1000; \\
 &\quad \quad \quad x_5 \quad \quad \quad + x_7 \quad \quad \quad = 800; \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad x_6 \quad \quad \quad + x_8 = 600; \\
 &x_i \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, 8.
 \end{aligned} \quad (3.88)$$

Ранг системы ограничений равен 5. После приведения системы ограничений к единичному базису получаем следующую математическую формулировку задачи: найти \min линейной формы

$$z = 57,936x_1 - 3,80x_2 - 6,094x_3 + 14295,8 - \min \quad (3.89)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned}
 &x_1 \quad \quad \quad + x_2 \quad \quad \quad = 200; \\
 &x_3 \quad \quad - 17,921x_4 - 1,711x_7 - 1,224x_8 = 67,766; \\
 &x_5 \quad \quad \quad + x_7 \quad \quad \quad = 800; \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad x_6 \quad \quad \quad + x_8 = 600; \\
 &x_9 + 17,921x_1 + 1,711x_7 + 1,224x_8 = 932,235; \\
 &x_i \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, 8.
 \end{aligned} \quad (3.90)$$

Решение задачи приведено в симплексной таблице (табл. 3.5).

Согласно табл. 3.5 минимум функции (3.87) достигается при следующих значениях переменных: $x_1 = 200$, $x_2 = 1000$, $x_3 = 684,37$, $x_4 = 0$, $x_5 = 115,63$, $x_6 = 0$, $x_7 = 600$, $x_8 = 0$.

Значит, искомое место заложения скважины будет на выработке 4—5 (см. рис. 2.5) на расстоянии 685 м от точки 4.

Решим задачу при изменяющихся с течением времени аэродинамических сопротивлениях.

В этом случае для схемы на рис. 2.5 функция цели запишется

$$\begin{aligned}
 &R_{22,0} \left(x_1 + \frac{\Delta l_{22}}{2} \right) Q_{22}^2 + R_{24,0} \left(x_2 + \frac{\Delta l_{24}}{2} \right) Q_{24}^2 + R_{45,0} \left(x_3 + \frac{\Delta l_{45}}{2} \right) Q_{45}^2 + \\
 &\quad + R_{26,0} \left(x_4 + \frac{\Delta l_{26}}{2} \right) Q_{26}^2 + R_{23,0} \left(x_5 + \frac{\Delta l_{23}}{2} \right) Q_{23}^2 + \\
 &\quad + R_{36,0} \left(x_6 + \frac{\Delta l_{36}}{2} \right) Q_{36}^2 + R_{43,0} \left(x_7 + \frac{\Delta l_{43}}{2} \right) Q_{43}^2 + \\
 &\quad + Q_{68} \left(x_8 + \frac{\Delta l_{68}}{2} \right) Q_{68}^2 - \min.
 \end{aligned} \quad (3.91)$$

При заданных параметрах, приведенных в табл. 3.4, согласно схеме на рис. 2.5 функции цели запишется в виде

$$z = 10,719x_1 + 1,875x_2 + 5,4x_3 + 6,328x_4 + 68,656x_5 + 1,875x_6 + 1,6x_7 + 0,234x_8 + 2662,5 \rightarrow \min. \quad (3.93)$$

Система ограничений

$$\left. \begin{aligned} 0,689x_1 + 0,084x_2 + 0,210x_3 + 0,169x_4 - 2,376x_5 - \\ - 0,084x_6 - 0,093x_7 - 0,019x_8 = 290,25; \\ x_1 + x_2 = 160; \\ x_2 + x_3 = 800; \\ x_3 + x_7 = 600; \\ x_1 - x_8 = 600; \\ x_i \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, 8. \end{aligned} \right\} \quad (3.94)$$

После приведения системы ограничений к единичному базису задача получит следующую математическую формулировку: найти \min линейной формы

$$z = 57,937x_1 - 3,8x_2 - 6,094x_3 + 12914,34 \rightarrow \min \quad (3.95)$$

при системе ограничений

$$\left. \begin{aligned} x_1 + x_2 = 160; \\ x_3 - 18,244x_6 - 1,804x_7 - 1,119x_8 = 117,917; \\ x_3 + x_7 = 600; \\ x_2 + x_1 = 600; \\ x_6 + 18,244x_3 + 1,804x_7 + 1,119x_8 = 682,083; \\ x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 8. \end{aligned} \right\} \quad (3.96)$$

Решение задачи симплексным методом приведено в табл. 3.6.

Согласно табл. 3.6 минимум функции (3.93) достигается при следующих значениях переменных: $x_1 = 160$, $x_2 = 800$, $x_3 = 694,078$, $x_4 = 0$, $x_5 = 0$, $x_6 = 0$, $x_7 = 5,922$, $x_8 = 600$.

Исключное место заложения скважины будет на выработке 3-4 на расстоянии 6 м от точки 4.

Пример 5. Определить места заложения скважин, подающих в шахту воздух для вентиляционной сети, изображенной на рис. 2.5. Параметры вентиляционной сети приведены в табл. 3.7.

Депрессии направления от точки 0 до точки 6 будут (в кгс/м²):

1-2-3-4-5-6	$h_1 = 244,12$
1-3-9-5-10-6	$h_2 = 206,78$
1-2-7-4-5-6	$h_3 = 186,62$
1-3-9-6-10-6	$h_4 = 183,00$
1-2-7-3-4-5-6	$h_5 = 182,37$
1-3-5-6	$h_6 = 107,62.$

Таблица 36

Имя	Свободный член	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	$\frac{a_{10}}{a_{19}}$
x_1	160	1	0	0	0	1	0	0	0	
x_2	117,917	0	1	0	0	-18,244	0	-1,804	-1,119	
x_3	600	0	0	1	0	0	0	1	0	
x_4	600	0	0	0	1	0	0	0	1	$\frac{600}{1}$
x_5	682,083	0	0	0	0	18,244	1	1,804	1,119	$\frac{682,083}{1,119}$
x_6	12914,34	0	0	0	0	-57,937	0	3,800	6,094	
x_7	160	1	0	0	0	1	0	0	0	
x_8	789,317	0	1	0	1,119	-18,244	0	-1,804	0	$\frac{600}{1}$
x_9	600	0	0	1	0	0	0	1	0	
x_{10}	600	0	0	0	1	0	0	0	1	
x_{11}	10,683	0	0	0	-1,119	18,244	1,804	1,804	0	$\frac{10,683}{1,804}$
x_{12}	9257,94	0	0	0	-6,094	-57,937	0	3,8	0	
x_{13}	160	1	0	0				0	0	
x_{14}	800	0	1	0				0	0	
x_{15}	594,078	0	0	1				0	0	
x_{16}	600	0	0	0				0	1	
x_{17}	5,922	0	0	0	-0,62	10,113	0,554	1	0	
x_{18}	9235,44	0	0	0	-3,738	-96,366	-2,105	0	0	

Аэродинамическое сопротивление скважины $R_{\text{сск}} = 0,0315 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^3$.

Примем выработки 1—2 и 2—3 горизонтальными. Максимально возможное снижение депрессии вентиляционной сети при заложении скважины

$$h_2' = h_1 - h_2 = 37,37 \text{ кгс}/\text{м}^2.$$

Находим возможное место заложения скважины на горизонтальной выработке 1—2.

Значения коэффициентов уравнения (3.62):

$$A_1 = 3,15 \cdot 10^{-2}, \quad B_1 = 1,89 \cdot 10^{-4}, \quad C_1 = 4,46 \cdot 10^{-4},$$

$$D_1 = 2,25 \cdot 10^{-2}, \quad E_1 = 2,06532.$$

После преобразований уравнение (3.62) примет вид

$$Q_{\text{сск}}^4 - 120Q_{\text{сск}}^3 + 1414,92Q_{\text{сск}}^2 - 142819,04Q_{\text{сск}} + 5820063,4 = 0. \quad (3.62')$$

Параметры	Уточнение корня									
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Q, м³/с	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
R, кгс·с/м²	0,002	0,01	0,06	0,012	0,016	0,009	0,008	0,03	0,03	0,04
h, м	20	30	73,5	54	50,62	5	40	6,75	44	23,75
h, м	—	1000	100	600	600	—	—	—	600	1000

Корни уравнения находятся методом Ньютона.

Для определения интервала, в котором находится действительный корень уравнения, устанавливаем знак функции

$$f(Q_{\text{свал}}) = Q_{\text{свал}}^4 - 120Q_{\text{свал}}^3 + 1414,92Q_{\text{свал}}^2 - 142819,04Q_{\text{свал}} + 5820063,4$$

и составляется приблизительная схема

Q _{свал} , м³/с	0	10	20	30	35
Знак f(Q _{свал})	+	+	+	+	-

Итак, действительным корнем уравнения (3.62) находится в интервале значений $Q_{\text{свал}} = 30-35$.

Для приближенного вычисления корня методом Ньютона используется выражение

$$Q_{\text{свал}, n+1} = Q_{\text{свал}, n} - \frac{f(Q_{\text{свал}, n})}{f'(Q_{\text{свал}, n})} \quad (3.97)$$

где

$$f'(Q_{\text{свал}}) = 4Q_{\text{свал}}^3 - 360Q_{\text{свал}}^2 + 2829,84Q_{\text{свал}} - 142819,04.$$

Уточнение корня производится в табл. 3.8.

Итак, с достаточной точностью

$$Q_{\text{свал}} = 31,36 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расстояние x , определяется по формуле (3.61) и равно 1900 м.

Так как $1900 > 1000$ м, решение задачи продолжается.

Находим возможное место заложения скважины на горизонтальной выработке 2—3.

Для определения расхода воздуха по скважине в случае ее заложения на выработке 2—3 решается уравнение

$$Q_{\text{свал}}^4 - 70Q_{\text{свал}}^3 + 510,75Q_{\text{свал}}^2 - 65335,59Q_{\text{свал}} - 2233559,3 = 0.$$

Получаем

$$Q_{\text{свал}} = 26,96 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таблица 2А

$Q_{\text{свая}}$	r (0,0001)	r' (0,0001)	$\Delta Q_{\text{свая}} = \frac{r'(0,0001)}{r(0,0001)}$
30	378 920,3	-273 981,84	+1,38
31,38	-6 689,11	-284 911,10	-0,02

Расстояние скважины от точки 2 будет $x_2 = 52,7$ м.

Так как $52,7 < 160$ м, то найденное значение x_2 и определяет место заложения скважины

Если необходимо снизить депрессию сети на 50 кгс/м², то скважины должны закладываться на выработках двух направлений, так как с помощью скважины можно будет снизить депрессию только на

$$h_1 - h_2 = 37,37 \text{ кгс/м}^2.$$

Так как

$$h_1 - h_2 = 58,5 \text{ кгс/м}^2.$$

то

$$h_1 - h_2 < 50 < h_1 - h_2.$$

Примем сопротивление скважин, буримых на выработках 1-2 — $R_{\text{свая1}}$ и 2-3 — $R_{\text{свая2}}$ равным $R_{\text{свая1}} = R_{\text{свая2}} = 0,0244$ кгс·с²/м⁶. $Q_{\text{свая1}}$ определяется как действительный корень уравнения

$$Q_{\text{свая1}}^6 - 120Q_{\text{свая1}}^4 + 2344,26Q_{\text{свая1}}^2 - 304918,03Q_{\text{свая1}} + 10327868 = 0.$$

Из (3.71') — $Q_{\text{свая1}} = 32,22$ м³/с и $x_{11} = 2092,5$.

$2092,5 > 1000$ м, и определяется место заложения скважины на выработке 2-3.

Из уравнения

$$Q_{\text{свая2}}^6 - 70Q_{\text{свая2}}^4 + 1177,05Q_{\text{свая2}}^2 - 120491,8Q_{\text{свая2}} + 3514340 = 0.$$

Находим $Q_{\text{свая2}} = 29,08$ м³/с и $x_{12} = 86,6$ м².

Так как $86,6 < 160$ м, то x_{12} определяет место заложения скважины на выработках направления с депрессией h_1 .

Для снижения депрессии сети на 50 кгс/м² необходимо заложить вторую скважину на выработках направления с депрессией h_2 , т. е. направления 1-8-9-b-10-6.

Находим возможное место заложения скважины сопротивлением $R_{\text{свая1}} = 0,0244$ кгс·с²/м⁶ на горизонтальной выработке 1-8.

Из уравнения

$$Q_{\text{свая1}}^6 - 80Q_{\text{свая1}}^4 + 2180,33Q_{\text{свая1}}^2 - 190163,33Q_{\text{свая1}} + 4590163,9 = 0.$$

находим $Q_{\text{свая1}} = 27,01$ м³/с и $x_{11} = 706,2$ м.

Так как $706,2 > 500$ м, то определяется возможное место заложения скважины на выработке 8—9, проведенной под углом $\alpha_{21} = 30^\circ$ (с уклоном в сторону точки 3). Предположим, точка 8 находится на глубине 300 м. Аэродинамическое сопротивление скважины, пробуренной в точку 8, $R_{сваж}$ = 0,0244 кгс·с²/м⁶.

Значения коэффициентов:

$$A_{21} = 1,44 \cdot 10^{-2}; \quad B_{21} = 2,24 \cdot 10^{-6};$$

$$C_{21} = -7,24 \cdot 10^{-4}; \quad D_{21} = 9,25 \cdot 10^{-4}; \quad E_{21} = 4,375.$$

После преобразований получим

$$Q_{сваж}^2 - 31,11Q_{сваж} - 503,05Q_{сваж} - \\ - 128472,22Q_{сваж} + 3038194,4 = 0.$$

Откуда $Q_{сваж} = 21,16$ м³/с и $x_{21} = 291,6$ м.

Так как $291,6 < 1000$ м, то x_{21} определяет место заложения скважины на выработке 8—9.

Итак, для того чтобы снизить на 50 кгс/м² депрессию сети, схема вентиляционных соединений которой представлена на рис. 2.5, имеющей депрессию разветвленной части 244,12 кгс/м², необходимо заложить две скважины: первую на выработке 2—3 (на расстоянии 85,6 м от точки 2), вторую на выработке 8—9 (на расстоянии 291,6 м от точки 8).

4. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ УПРОЩЕНИЕМ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время при расчете вентиляционных систем преимущественно по точкам, выбранным на рабочей части характеристик вентиляторов, составляются эмпирические формулы, описывающие характеристики. Затем вентиляционная система описывается системой уравнений, при решении которой определяются необходимые величины. При расчете вентиляционных систем с использованием метода предварительного упрощения эквивалентными преобразованиями после выбора достаточного числа равномерно расположенных на рабочей части характеристики вентилятора точек и записи их координат $M_i, (Q_i, h_i), i = 1, 2, \dots, n$ (Q_i — производительность вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$, h_i — депрессия вентилятора, $\text{кгс}/\text{м}^2$, n — число точек, выбранных на характеристике вентилятора) производится упрощение вентиляционной системы. Процесс упрощения сопровождается трансформацией координат точек в таблицах. Вентиляционную систему со сложной вентиляционной сетью можно привести к заданному простому виду вентиляционной сети с расположенным в конечной точке приведенным вентилятором.

После упрощения вентиляционной системы по трансформированным координатам описывается характеристика приведенных вентиляторов и строится математическая модель упрощенной вентиляционной системы. Если вентиляционная система не приводится к виду с однолинейной сетью, описание упрощенной вентиляционной системы производится системой уравнений. Однако число уравнений в системе значительно меньше, чем в случае без предварительного упрощения системы.

Упрощение вентиляционной системы является многоступенчатым процессом и сопровождается перемещением вентилятора в ряд последовательно расположенных узлов вентиляционной сети, навстречу движению воздуха. Направление перемещения вентилятора выбирается с учетом конечного вида упрощенной вентиляционной системы.

При перемещении вентилятора исключаются последовательно расположенные выработки (по которым он перемещается), что соответствует трансформации ординат точек характеристики вентилятора. Перед каждым новым перемещением вентилятора производится исключение параллельно расположенных

выработок, что соответствует трансформации абсцисс указанных точек.

При трансформации координат из характеристики вентилятора вычитаются характеристики последовательно соединенных участков по ординатам, а параллельно соединенных — по абсциссам. После каждого шага точки с трансформированными координатами будут являться точками характеристики вентилятора, приведенного в новый узел сети.

С помощью одной трансформации координат могут исключаться как отдельные выработки, так и соединения их.

4.2. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА ПО ВЫРАБОТКАМ ШАХТЫ, ПРОВЕТРИВАЕМОЙ ОДНИМ ВЕНТИЛЯТОРОМ

Метод позволяет производить расчет как естественного распределения воздуха по всем выработкам вентиляционной сети, так и в случае, когда расходы воздуха по отдельным выработкам заданы, т. е. производится регулирование распределения воздуха.

Принимаются заданными расходы воздуха по выработкам, где установлены регуляторы.

Будем производить дальнейшее изложение метода в привязке к конкретной вентиляционной системе.

Рассмотрим эквивалентные преобразования вентиляционной системы на рис. 4.1, а до вида на рис. 4.1, б.

Предположим расходы воздуха по направлениям 1—9—12—б и 3—б—4 заданными.

Опишем в общем виде процесс упрощения рассматриваемой вентиляционной системы. Выбираем точки на характеристике вентилятора M_{11} (Q_{11} , h_{11}).

1 шаг. Определяются ординаты точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 7 — M_{71} (Q_{71} , h_{71}). С этой целью из вентиляционной системы исключается выработка 7—8

$$h_{71} = h_{11} - R_{71} Q_{11}^2. \quad (4.1)$$

Здесь и в последующих формулах h_{11} — ординаты i -й точки характеристики вентилятора, приведенного в i -й узел вентиляционной системы.

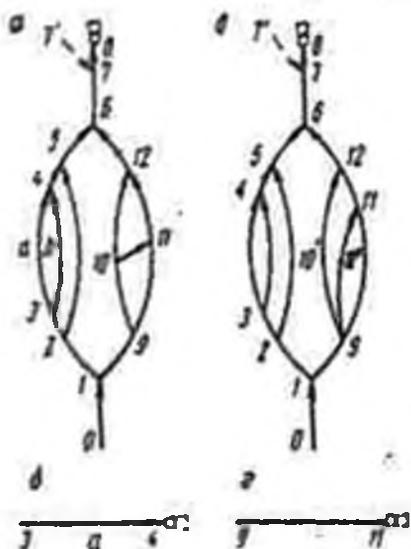


Рис. 4.1. Схемы вентиляционной системы и ее преобразования

II шаг. Определяются абсциссы точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 7, после исключения внешних утечек воздуха по направлению 7'—7—M₇₁ (Q₇₁, h₇₁)

$$Q_{71} = Q_{71} - \sqrt{\frac{h_{71}}{R_{71,2}}}, \quad (4.2)$$

где R_{71,2} — аэродинамическое сопротивление надшахтного здания, кгс·с²/м⁶.

Здесь и в последующих формулах Q₇₁ — абсцисс i-й точки характеристики вентилятора, приведенного в j-й узел, после исключения параллельной выработки из вентиляционной системы.

III шаг. Определяются ординаты точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 6, после исключения выработок 0—1 и 6—7 — M₆₁ (Q₆₁, h₆₁):

$$h_{61} = h_{71} - (R_{61} + R_{67}) Q_{71}. \quad (4.3)$$

IV шаг. Определяются абсциссы точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 6, после исключения параллельной выработки 1—9—12—6 с заданным расходом воздуха M₆₁ (Q₆₁, h₆₁):

$$Q_{61} = Q_{71} - Q_{111126}. \quad (4.4)$$

V шаг. Определяются ординаты точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 5, с исключением выработок 1—2 и 5—6 — M₅₁ (Q₅₁, h₅₁).

$$h_{51} = h_{61} - (R_{51} + R_{56}) Q_{61}. \quad (4.5)$$

VI шаг. Определяются абсциссы точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 5, после исключения параллельной выработки 2—5 — M₅₁ (Q₅₁, h₅₁)

$$Q_{51} = Q_{61} - \sqrt{\frac{h_{51}}{R_{52}}}. \quad (4.6)$$

VII шаг. Определяются ординаты точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 4, после исключения выработок 2—3 и 4—5 — M₄₁ (Q₄₁, h₄₁):

$$h_{41} = h_{51} - (R_{41} + R_{45}) Q_{51}. \quad (4.7)$$

VIII шаг. Определяются абсциссы точек характеристики вентилятора, приведенного в узел 4, после исключения выработки 3—b—4 с заданным расходом воздуха — M₄₁ (Q₄₁, h₄₁):

$$Q_{41} = Q_{51} - Q_{3b4}. \quad (4.8)$$

Итак, за восемь шагов вентиляционная система, представленная на рис. 4.1, а, приведена к виду, изображенному на рис. 4.1, б.

Формы, где производится трансформация координат точек, дается в табл. 4.1. В этой же таблице перечисляются операции трансформации координат для рассматриваемой задачи.

В табл. 4.1 в первой строке записываются координаты точек, выбранных на характеристике вентилятора, каждая последующая строка посвящается одному шагу трансформации координат. После приведения вентилятора в конечную точку упрощенной сети производится описание характеристики приведенного вентилятора эмпирической формулой вида

$$h = f(Q). \quad (4.9)$$

Обычно описание производится с помощью аппроксимирующих полиномов.

Таблица 4.1

№	Наименование операции трансформации	Номер точки на характеристике вентилятора									
		1		2		3		...	n		
		Q	h	Q	h	Q	h		Q	h	
1	Координаты точек на характеристике вентилятора	Q_{01}	h_{01}	Q_{02}	h_{02}	Q_{03}	h_{03}	...	Q_{0n}	h_{0n}	
2	Приведение вентилятора в узел 7 с включением выработок 7—8	Q_{11}	h_{11}	Q_{12}	h_{12}	Q_{13}	h_{13}	...	Q_{1n}	h_{1n}	
3	Исключение ветви из точек воздуха	Q_{21}	h_{21}	Q_{22}	h_{22}	Q_{23}	h_{23}	...	Q_{2n}	h_{2n}	
4	Приведение вентилятора в узел 6 с включением выработок 0—1 и 6—7	Q_{31}	h_{31}	Q_{32}	h_{32}	Q_{33}	h_{33}	...	Q_{3n}	h_{3n}	
5	Исключение ветви 1—9—12—6	Q_{41}	h_{41}	Q_{42}	h_{42}	Q_{43}	h_{43}	...	Q_{4n}	h_{4n}	
6	Приведение вентилятора в узел 5 с включением выработок 1—2 и 5—6	Q_{51}	h_{51}	Q_{52}	h_{52}	Q_{53}	h_{53}	...	Q_{5n}	h_{5n}	
7	Исключение выработок 2—5	Q_{61}	h_{61}	Q_{62}	h_{62}	Q_{63}	h_{63}	...	Q_{6n}	h_{6n}	
8	Приведение вентилятора в узел 4 с включением выработок 3—4 и 4—5	Q_{71}	h_{71}	Q_{72}	h_{72}	Q_{73}	h_{73}	...	Q_{7n}	h_{7n}	
9	Исключение выработок 3—6—1	Q_{81}	h_{81}	Q_{82}	h_{82}	Q_{83}	h_{83}	...	Q_{8n}	h_{8n}	

В общем случае для описания этой характеристики можно использовать один из методов приближения функций — точечное квадратичное аппроксимирование функции, применяемое при заданном порядке m приближающего полинома $P_m(Q)$ и числе узлов n значительно больше порядка полинома. Для нахождения полинома обычно используется точечный способ наименьших квадратов, согласно которому за меру отклонения аппроксимирующего полинома

$$P_m(Q) = \beta_0 + \beta_1 Q + \dots + \beta_m Q^m \quad (4.10)$$

Для аппроксимации функции, описывающей характеристику приведенного вентилятора, достаточно принять аппроксимирующий полином 2-й степени. В данном случае расчеты могут выполняться без применения ЭВМ.

Если характеристика приведенного вентилятора описывается уравнением

$$h = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 Q^2 \quad (4.17)$$

то для составления системы (4.13) рекомендуется схема способа наименьших квадратов, приведенная в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Q^*	Q	Q^2	Q^3	Q^4	h	Qh	Q^2h
1	Q_0	Q_0^2	Q_0^3	Q_0^4	h_0	$Q_0 h_0$	$Q_0^2 h_0$
1	Q_1	Q_1^2	Q_1^3	Q_1^4	h_1	$Q_1 h_1$	$Q_1^2 h_1$
1	Q_2	Q_2^2	Q_2^3	Q_2^4	h_2	$Q_2 h_2$	$Q_2^2 h_2$
1	Q_3	Q_3^2	Q_3^3	Q_3^4	h_3	$Q_3 h_3$	$Q_3^2 h_3$
1	Q_4	Q_4^2	Q_4^3	Q_4^4	h_4	$Q_4 h_4$	$Q_4^2 h_4$
1	Q_5	Q_5^2	Q_5^3	Q_5^4	h_5	$Q_5 h_5$	$Q_5^2 h_5$
1	Q_6	Q_6^2	Q_6^3	Q_6^4	h_6	$Q_6 h_6$	$Q_6^2 h_6$
S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	L_0	L_1	L_2

Полученную систему уравнений (4.16) можно решить методом исключения неизвестных Гаусса.

В пункте 4.7 (пример 1) дан численный пример описания характеристики приведенного вентилятора с помощью точечного способа наименьших квадратов. Для нахождения коэффициентов полинома (4.17) можно воспользоваться методами составления эмпирических формул.

Изложенный выше порядок упрощения вентиляционной системы эквивалентными преобразованиями является общим для всех вентиляционных задач, решаемых с применением рассматриваемого метода.

Рассмотрим расчет распределения воздуха по выработкам вентиляционной сети с одним вентилятором, работающим на сеть.

Приведенная система описывается уравнением

$$RQ^3 = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 Q^2 \quad (4.18)$$

где R — аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети, кгс·с³/м⁶.

Из уравнения (4.18) определяется расход воздуха Q для вентиляционной сети с сопротивлением R . По известному расходу воздуха и аэродинамическому сопротивлению определяется депрессия приведенной вентиляционной сети h_d . Эта депрессия

однолинейной сети. Однако, с учетом основного свойства параллельного соединения выработок, эта депрессия определяет депрессию параллельного соединения выработок. Используя эту депрессию, по данным табл. 4.1, где производится трансформация координат точек, находится расход воздуха по параллельному соединению (см. рис. 4.1, а). С этой целью в строке, соответствующей приведению вентилятора в конечную точку до исключения параллельной выработки, находится отрезок

$$h_{b,i} \geq h_b \geq h_{b,i} \quad (4.19)$$

Расход воздуха Q_b по параллельному соединению выработок, как одна из координат точки $M_b(Q_b, h_b)$, расположенной между точками M_{b-1} и M_{b+1} , находится путем интерполирования.

При расположении точек M_{b-1} и M_{b+1} на небольшом отрезке достаточная точность обеспечивается при линейном интерполировании.

При линейном интерполировании для точки $M_b(Q_b, h_b)$:

$$h_b = \frac{h_{b+1}Q_{b-1} - h_{b-1}Q_{b+1}}{Q_{b-1} - Q_{b+1}} + \frac{h_{b-1} - h_{b+1}}{Q_{b-1} - Q_{b+1}} Q_b \quad (4.20)$$

$$Q_b = \frac{(h_b - h_{b+1})Q_{b-1} + (h_{b-1} - h_b)Q_{b+1}}{h_{b-1} - h_{b+1}} \quad (4.21)$$

При большом интервале между точками производится параболическое интерполирование.

В общем случае для трех точек можно написать систему трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \beta_0 + \beta_1 Q_1 + \beta_2 Q_1^2 \\ h_2 &= \beta_0 + \beta_1 Q_2 + \beta_2 Q_2^2 \\ h_3 &= \beta_0 + \beta_1 Q_3 + \beta_2 Q_3^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

Для нахождения коэффициентов β_0 , β_1 и β_2 матрица

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & Q_1 & Q_1^2 & h_1 \\ 1 & Q_2 & Q_2^2 & h_2 \\ 1 & Q_3 & Q_3^2 & h_3 \end{array} \right) \quad (4.23)$$

приводится к треугольному виду.

Если одна из координат точки $M_n(Q_n, h_n)$ известна, вторая находится из уравнения

$$h_n = \beta_0 + \beta_1 Q_n + \beta_2 Q_n^2 \quad (4.24)$$

Определив расход воздуха по параллельному соединению выработок и зная расход воздуха по одной из выработок параллельного соединения, определяют расход воздуха по другой выработке.

ботке параллельного соединения. Таким путем обходят всю вентиляционную сеть в направлении, обратном направлению упрощения системы. Депрессия любого соединения определяется как сумма депрессий выработок по одному из направлений, в которое не входят выработки с заданным расходом воздуха. При этом депрессия всех последующих соединений находится путем суммирования депрессий следующих выработок с известной депрессией рассмотренных соединений. Если к выработкам, по которым перемещался вентилятор при преобразованиях, подходят выработки с заданным расходом воздуха, то расход воздуха соединения определяется простым суммированием (без интерполирования функции между точками).

Применительно к рассматриваемой схеме вентиляционных соединений на рис. 4.1, б из уравнения, аналогичного уравнению (4.18), определяется

$$Q_{201} = \frac{-\beta_1 \pm \sqrt{\beta_1^2 - 4\beta_2(\beta_1 - R_{201})}}{2(\beta_2 - R_{201})}.$$

Так как расход воздуха по выработке 3—б—4 задан, то расход воздуха по параллельному соединению и прилегающим выработкам

$$Q_{201} = Q_{20} = Q_{03} = Q_{201} + Q_{204}. \quad (4.25)$$

Депрессия соединения 2—5 будет

$$h_{201} = R_{20}Q_{20}^2 + R_{204}Q_{204}^2 + R_{12}Q_{12}^2. \quad (4.26)$$

Зная h_{201} , по данным строки б табл. 4.1 находят отрезок, в котором заключена эта депрессия. С помощью формулы (4.21) определяется Q_{201} , а также расходы воздуха Q_{12} и Q_{03} . Расход воздуха по выработке 2—5 будет

$$Q_{25} = Q_{201} - Q_{03}. \quad (4.27)$$

Расход воздуха по выработкам 0—1 и 6—7 равен

$$Q_{01} = Q_{07} = Q_{03} + Q_{10101}. \quad (4.28)$$

Депрессия части вентиляционной сети до точки 7

$$h_{071} = R_{01}Q_{01}^2 + R_{12}Q_{12}^2 + h_{201} + R_{14}Q_{14}^2 + R_{07}Q_{07}^2. \quad (4.29)$$

Зная h_{071} , по данным строки 2 табл. 4.1 находят отрезок, в котором расположена депрессия, и по формуле (4.21) определяют $Q_{07} = Q_1$.

Внешние утечки равны

$$Q_{1, y} = Q_{07} - Q_{07}. \quad (4.30)$$

В пункте 4.7 (пример 2) приведен расчет распределения воздуха в вентиляционной системе, изображенной на рис. 4.1, а.

Если на пути преобразования вентиляционной системы расположены диагональные соединения или комбинированные соединения, имеющие в качестве внутренних выработок усложненные дополнителными разветвлениями диагонали, то предварительно производится преобразование вентиляционной сети с исключением диагоналей или внутренних выработок указанного вида. Для преобразования соединений используются методы, изложенные в пункте 6.

Диагональные выработки и внутренние выработки в виде усложненных диагоналей в сети любой сложности легко исключаются, если известно распределение воздуха хотя бы при одном из режимов работы вентилятора. Отдельные выработки заменяются двумя и более эквивалентными выработками. Депрессия этих выработок принимается равной депрессии исходной выработки h_{ij} (индекс i — порядковый номер направления, индекс j — порядковый номер выработки в направлении), а расходы воздуха принимаются равными расходам по выработкам, на которые данная выработка разветвляется. Если выработка заменяется двумя эквивалентными и расходы воздуха по ним

$$Q_{i, j+1} = Q_{i+1, j+1}$$

то

$$Q_{ij} = Q_{i, j+1} + Q_{i+1, j+1} \quad (4.31)$$

Аэродинамические сопротивления эквивалентных выработок определяются

$$R_{i, j+1} = \frac{h_{ij}}{Q_{i, j+1}^2}; \quad R_{i+1, j+1} = \frac{h_{ij}}{Q_{i+1, j+1}^2} \quad (4.32)$$

Так от схемы на рис. 4.1, а можно перейти к схеме на рис. 4.1, в. При таком переходе выработка 9—10 заменяется эквивалентными выработками 9—10' и 9—10". Необходимые условия перехода:

$$Q_{9, 10'} = Q_{9, 10}; \quad Q_{9, 10''} = Q_{9, 10}$$

$$R_{9, 10'} = \frac{h_{9, 10}}{Q_{9, 10'}^2}; \quad R_{9, 10''} = \frac{h_{9, 10}}{Q_{9, 10''}^2} \quad (4.33)$$

Если для вентиляционной системы на рис. 4.1, а задан расход воздуха по направлению 2—3—4—5, то расчет распределения воздуха производится путем упрощения системы до вида на рис. 4.1, г. При этом предварительно производится преобразование вентиляционной сети для исключения диагональных соединений. В остальном порядок решения задачи остается прежний.

Если в вентиляционной сети при наличии двух групп направлений, примыкающих к конечной точке разветвленной части сети, распределение воздуха не регулируется, то преобразование вентиляционной системы следует производить при перемещении вентилятора в первую очередь по выработкам более сложной части

вентиляционной сети, так как это упрощает определение необходимого аэродинамического сопротивления соединений. Распределение воздуха внутри более простой части может производиться обычными способами расчета вентиляционных соединений. Так, предположим, в рассматриваемой вентиляционной системе задан только расход воздуха по выработке 3—b—4. Тогда упрощенные системы следует производить до вида на рис. 4.1, з. При этом аэродинамическое сопротивление части сети по направлению 1—2—3—4—5—6— легко определится. Определение общего расхода по этому направлению позволяет найти распределение воздуха по всем выработкам этого направления. Если это затруднительно, то производят упрощенные сети дважды — сначала по одной, затем по другой группам направлений.

4.3. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА ПО ВЫРАБОТКАМ ШАХТЫ С ДВУМЯ И БОЛЕЕ ВЕНТИЛЯТОРАМИ

Метод предварительного упрощения вентиляционной системы может использоваться для расчета распределения воздуха по выработкам шахты с двумя и более вентиляторами. Суммарная характеристика приведенных в одну точку вентиляторов с достаточной точностью описывается аппроксимирующим полиномом (4.17).

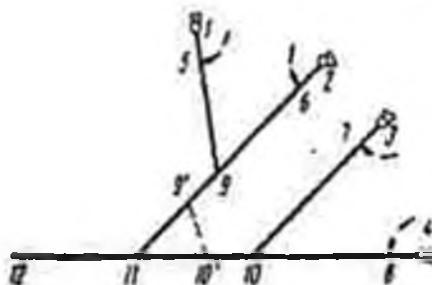


Рис. 4.2. Схема вентиляционной системы с четырьмя вентиляторами

Математическая модель приведенной вентиляционной системы, как и при одном вентиляторе, записывается в виде (4.18).

Пример. Пусть вентиляционная система состоит из четырех вентиляторов, расположенных в точках 1, 2, 3 и 4 (рис. 4.2), а выработки 9'—10' (показаны штриховой линией) отсутствуют.

Приняв по характеристике кривые для всех вентиляторов по заданному распределению воздуха, на каждой из них выбираем достаточное количество точек $M_{ij}(Q_{ij}, h_{ij})$. Индекс i указывает номер вентилятора на схеме, $i = 1, 2, 3, 4$, индекс j — порядковый номер точки на характеристике вентилятора, $j = 1, 2, \dots, n$. Ниже приводится дальнейший порядок решения задачи.

1. Находятся координаты трансформированных точек после приведения вентиляторов в точки $g = 5, 6, 7, 8$ и исключения внешних утечек, т. е. $M_{ij}(Q_{ij}, h_{ij})$:

$$h_{ij} = h_{ij} - R_{ij} Q_{ij}^2$$

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \sqrt{\frac{h_{ij}}{R_{ij}}}, \quad (4.34)$$

где R_{1k} — аэродинамическое сопротивление выработок 1—5, 2—6; 3—7, 4—8, кгс с²/м⁶.

$R_{a,1j}$ — аэродинамическое сопротивление надыхтных зданий вентиляторов в точках $l = 1, 2, 3, 4$, кгс с²/м⁶.

Координаты трансформированных точек после приведения вентиляторов в точки $k = 9, 10$ — $M_{20j}(Q_{20j}, h_{20j})$ будут

$$\begin{aligned} h_{20j} &= h_{21j} - R_{a1} Q_{21j}^2; \\ Q_{20j} &= Q_{21j}. \end{aligned} \quad (4.35)$$

3. Находятся точки суммарных характеристик вентиляторов, приведенных в точки $k = 9, 10$ — $M_{20j}(\sum Q_{21j}, h_{20j})$. При этом точки одного из приведенных вентиляторов заменяются точками, найденными интерполированием по формуле (4.21):

$$\begin{aligned} \sum Q_{21j} &= Q_{21j} + Q_{220j}; \\ \sum Q_{210j} &= Q_{210j} + Q_{220j}. \end{aligned} \quad (4.36)$$

где Q_{210j} и Q_{220j} — абсциссы приведенных вентиляторов 1 и 3 в точки 9 и 10;

Q_{220j} и Q_{2110j} — преобразованные по заданной величине ординат абсциссы приведенных вентиляторов 2 и 4 в точки 9 и 10.

Если необходимо увеличить число точек, то интерполирование функции производится для обоих вентиляторов с использованием точек другого. Таким путем можно удвоить число точек.

4. Координаты трансформированных точек после приведения суммарных вентиляторов в точку 11 — $M_{211j}(Q_{211j}, h_{211j})$

$$\begin{aligned} h_{211j} &= h_{20j} - R_{211} (\sum Q_{21j})^2; \\ Q_{211j} &= \sum Q_{21j}. \end{aligned} \quad (4.37)$$

5. Находятся координаты точек суммарных характеристик вентиляторов, приведенных в точку 11, $M_{11j}(\sum Q_{211j}, h_{11j})$:

$$\begin{aligned} \sum Q_{211j} &= Q_{211j} + 10_{2111j}; \\ h_{11j} &= h_{211j}. \end{aligned} \quad (4.38)$$

6. По полученным точкам $M_{11j}(Q_{\sum 211j}, h_{11j})$ составляется уравнение, описывающее суммарную характеристику вентиляторов, приведенных в точку 11.

7. Расход воздуха, поступающего в шахту по выработке 11—12, определяется из уравнения (4.18), где R — аэродинамическое сопротивление выработки 11—12.

В Расходы воздуха по выработкам $11-9$ и $11-10$ определяются по величине депрессии h_{111} и h_{112} и положению этой депрессии на суммарных характеристиках вентиляторов 1, 2 и 3, 4, приведенных в точку 11, используя формулу (4.21)

Аналогично определяется распределение воздуха по другим выработкам Трансформации координат точек характеристик вентиляторов и нахождение точек суммарных характеристик (с последующей их трансформацией) могут производиться в таблице аналогичной табл. 5.1.

Операции трансформации применительно к схеме на рис. 4.2 для вентиляторов 1 и 2 будут следующими:

1) координаты точек характеристики вентилятора 1; 2) приведение вентилятора 1 в точку 5; 3) исключение внешних утечек воздуха; 4) приведение вентилятора 1 в точку 9; 5) координаты точек характеристики вентилятора 2; 6) приведение вентилятора 2 в точку 6; 7) исключение внешних утечек воздуха; 8) приведение вентилятора 2 в точку 9; 9) координаты точек вентилятора 2, приведенного в точку 9, после интерполирования; 10) координаты точек суммарной характеристики вентиляторов 1 и 2, приведенных в точку 9; 11) приведение вентиляторов 1 и 2 в точку 11 путем трансформации точек суммарной характеристики.

При заданном распределении воздуха обычно предварительно определяются депрессии направлений на все вентиляторы. Это позволяет произвести выбор угла установки лопаток вентилятора. При решении задачи уточняется распределение воздуха по направлениям при выбранных углах установки лопаток. Если заданы количества воздуха, поступающего в очистные забои, возникает необходимость регулирования распределения его в разветвлениях сети. В этом случае аэродинамическое сопротивление разветвленной части сети R_c определяется

$$R_c = \frac{\max \{h_i\}}{Q_c^2}, \quad (4.39)$$

где h_i — суммарная депрессия выработок по i -му направлению между конечными точками разветвления, кгс/м²;

Q_c — расход воздуха по разветвленной части сети, м³/с.

При работе двух и более вентиляторов на вентиляционную сеть, усложненную диагональной выработкой между ветвями на вентиляторы, метод предварительного упрощения вентиляционной системы позволяет упростить решение задачи путем уменьшения числа уравнений, описывающих вентиляционную систему.

Для расчета распределения воздуха в вентиляционной системе, изображенной на рис. 4.2 (с учетом выработки 9—10), без использования метода предварительного упрощения решается система из девяти уравнений второй степени.

При использовании метода вентиляторы 1 и 2 приводятся в точку 9, а вентиляторы 3 и 4 — в точку 10 и описываются суммар-

ные характеристики приведенных вентиляторов. Это позволяет в системе число уравнений уменьшить до трех:

$$\left. \begin{aligned} R_{11,12}(Q_9 + Q_{10})^2 + R_{9,11}|Q_9 - (Q_{10}' - Q_{10})|^2 + \\ + R_{9,12}Q_9^2 = \beta_{10} + \beta_{11}Q_9 + \beta_{12}Q_9^2, \\ R_{11,12}(Q_9 + Q_{10})^2 + R_{10',11}Q_{10}'^2 + R_{10',12}Q_{10}'^2 = \\ = \beta_{20} + \beta_{21}Q_{10}' + \beta_{22}Q_{10}'^2, \\ R_{9,11}|Q_9 - (Q_{10}' - Q_{10})|^2 = R_{10',11}Q_{10}'^2 + \\ + \frac{Q_{10}' - Q_{10}}{|Q_{10}' - Q_{10}|} R_{10',12}(Q_{10}' - Q_{10})^2. \end{aligned} \right\} (4.40)$$

где β_{10} , β_{11} , β_{12} — коэффициенты эмпирической формулы, описывающей суммарную характеристику приведенных вентиляторов (при $l = 1$ — в точку 9 , при $l = 2$ — в точку $10'$);

Q_9 , Q_{10} , Q_{10}' — расходы воздуха по выработкам 9 — 9 , $10'$ — 10 , 11 — $10'$, $\text{м}^3/\text{с}$

4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА ПО НОВОЙ ВЫРАБОТКЕ В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

В период эксплуатации шахты очень важно знать расход воздуха по вновь пройденной горной выработке. Это относится и к подземным вентиляционным скважинам, которые в настоящее время в большом количестве бурятся в шахтах Западного Донбасса. Поставленная задача довольно легко решается после предварительного упрощения вентиляционной системы.

Метод позволяет одновременно определить новые расходы воздуха по существующим выработкам после проведения новой и, в первую очередь, по прилегающим выработкам. При решении задачи для подземных выработок можно выделить два случая. 1) новая выработка двумя концами примыкает к одной выработке или к последовательному соединению выработок, производя дополнительное разветвление сети; 2) новая выработка превращает параллельное соединение выработок в диагональное.

В первом случае вентиляционная система упрощается путем приведения вентилятора в конечную точку (по ходу направления примыкания новой выработки (рис. 4.3, а) и исключения выработки, к которой примыкает новая выработка, т. е. вентиляцион-

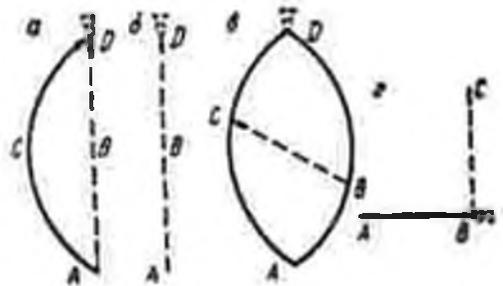


Рис. 4.2. Схемы предварительного упрощения вентиляционной системы при расчете расхода воздуха по новой выработке

вая система преобразуется до вида на рис. 4.3. б, во втором случае — путем приведения вентилятора в конечную точку параллельного сдвигания (рис. 4.3. а)

Расход воздуха по новой выработке в первом случае после приведения вентилятора в точку I и включения выработки ACD определяется из уравнения, аналогичного (4.18). Во втором случае определение расхода воздуха по диагональной и прилегающим выработкам аналогично расчету распределения воздуха в диагональном соединении. Однако, в отличие от последнего, общий расход воздуха по приведенной вентиляционной системе неизвестен.

Прямое направление движения воздуха по новой выработке от точки B к точке C . Обозначим аэродинамические сопротивления и расходы воздуха по выработкам (рис. 4.3. а): $AC - R_1, Q_1$; $BC - R_2, Q_2$; $BD - R_3, Q_3$; $AB - R_4, (Q_1 + Q_2)$; $CD - R_5, (Q_1 + Q_2)$.

Вентиляционная система, приведенная на рис. 4.3. а, опишется системой трех уравнений второй степени:

$$\left. \begin{aligned} R_1 Q_1^2 + R_5 (Q_1 + Q_2)^2 &= \beta_0 + \beta_1 (Q_1 + Q_2 + Q_3) + \\ &+ \beta_2 (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2, \\ R_1 Q_1^2 &= R_4 (Q_1 + Q_2)^2 + R_2 Q_2^2, \\ R_2 Q_2 &= R_3 (Q_1 + Q_2)^2 + R_5 Q_2^2, \end{aligned} \right\} (4.41)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ — коэффициенты эмпирической формулы, описывающей характеристику вентилятора, приведенного в точку D .

В общем случае система уравнений решается методом линеаризации. Предлагается более простой метод решения.

Разделим два последних уравнения системы (4.41) на Q_2^2 и обозначим $\frac{Q_1}{Q_2} = x, \frac{Q_3}{Q_2} = y$, тогда:

$$\left. \begin{aligned} R_1 x^2 &= R_4 (1 + y)^2 + R_2, \\ R_2 y^2 &= R_3 (1 + x)^2 + R_5. \end{aligned} \right\} (4.42)$$

Решение системы уравнений (4.42) может производиться одним из методов, известных в технической литературе. В пункте 6 книги предлагается решение системы с использованием методов приближенных вычислений. С этой целью переходят к уравнению с одним неизвестным 4-й степени, которое решается методом Ньютона.

Для определения Q_2 подставим значения $Q_1 = Q_2 x, Q_3 = Q_2 y$ в первое уравнение системы (4.41). Получим уравнение второй степени, из которого

$$Q_2 = \frac{A \pm \sqrt{B^2 + 4AB_0}}{2A}, \quad (4.43)$$

где

$$A = R_1 x^3 + R_2 (1+x)^3 - \beta_1 (1+x+y);$$
$$B = \beta_2 (1+x+y)$$

В более сложных случаях метод позволяет значительно упростить решение задачи за счет уменьшения числа уравнений в системе.

Расход воздуха по новым выработкам, пройденным с поверхности, в том числе по вентиляционным скважинам, определяется после приведения вентиляционной системы к виду, изображенному на рис. 4.3, г. Приведенная вентиляционная система описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_1 Q_1^2 - \beta_0 + \beta_1 (Q_1 + Q_{n.а}) + \beta_2 (Q_1 + Q_{n.а})^2; \\ R_2 Q_2^2 = R_{a.в} Q_0^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

где $Q_1, Q_{n.а}$ — расходы воздуха по выработкам AB и BC , m^3/c ;
 $R_1, R_{a.в}$ — аэродинамические сопротивления выработок AB (к которой приводится сеть) и BC (пройденной с поверхности), $кгс\ c^2/m^4$.

Система уравнений (4.14) относительно Q_1 и $Q_{n.а}$ решается методом линеаризации.

4.5. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВЫЕМОЧНОМ УЧАСТКЕ

В настоящее время существующие методы расчета регулирования распределения воздуха на выемочном участке предполагают, что расход воздуха, подходящего к выемочному участку до регулирования, сохраняется и после произведенного изменения вентиляционной системы для перераспределения воздуха. Пусть выемочный участок представляет собой параллельное соединение выработок и расход воздуха при естественном распределении по ветвям Q_1, Q_2 ($Q = Q_1 + Q_2$). Тогда при расчете регулирования для увеличения расхода воздуха в одной ветви $Q_1 > Q$ принимают расход в другой ветви $Q_2 = Q - Q_1$, т. е. $Q = const$.

Фактически, в связи с вхождением выемочного участка в вентиляционную систему, общий расход воздуха после регулирования не остается постоянным — он увеличивается или уменьшается в зависимости от вида регулирования.

При расчете регулирования на отдельных выемочных участках учесть влияние вентиляционной системы на определяемые параметры можно при использовании метода предварительного упрощения вентиляционной системы. В этом случае вентиляционная система упрощается до параллельного соединения с приведенным вентилятором и конечной точкой.

Рассмотрим первоначально отрицательное регулирование. Обозначим расход воздуха по выработкам при естественном рас-

пределах по левой ветви — Q_1 , по правой — Q_2 . Пусть по левой выработке необходимо подать количество воздуха $Q_i > Q_1$. С этой целью на правой выработке можно установить регулятор с сопротивлением R_p . Тогда приведенная вентиляционная система с регулятором опишется системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_1 Q_i^2 &= \beta_0 + \beta_1 (Q_1 + Q_2) + \beta_2 (Q_1 + Q_2)^2; \\ R_1 Q_i^2 &= (R_2 + R_p) Q_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (4.45)$$

где Q_2 — расход воздуха по первой выработке, м³/с;
 R_1, R_2 — аэродинамические сопротивления левой и правой выработок;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ — коэффициенты эмпирической формулы, описывающей характеристику вентилятора, приведенного в конечную точку.

В системе уравнений (4.45) неизвестными являются Q_2 и R_p . Q_2 определяется из первого, R_p — из второго уравнений системы:

$$Q_2 = \frac{-\beta_1 + 2\beta_2 Q_1 + \sqrt{\beta_1^2 + 4(\beta_2 + \beta_2 R_1) Q_1^2 - 4\beta_0 \beta_2}}{2\beta_2}; \quad (4.46)$$

$$R_p = R_1 m^2 - R_2, \quad (4.47)$$

где

$$m = \frac{Q_i}{Q_2}.$$

Так как Q_2 действительное число, то из (4.46) следует

$$\beta_1^2 + 4(\beta_2 + \beta_2 R_1) Q_1^2 - 4\beta_0 \beta_2 > 0. \quad (4.48)$$

Из последнего:

$$Q_1^2 > \frac{4\beta_0 \beta_2 - \beta_1^2}{4(\beta_2 + \beta_2 R_1)}, \text{ если } \beta_2 + \beta_2 R_1 > 0; \quad (4.49)$$

$$Q_1^2 < \frac{4\beta_0 \beta_2 - \beta_1^2}{4(\beta_2 + \beta_2 R_1)}, \text{ если } \beta_2 + \beta_2 R_1 < 0. \quad (4.50)$$

Критерием возможности заданного перераспределения воздуха с помощью регулятора будет существование системы неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1^2 + 4(\beta_2 + \beta_2 R_1) Q_1^2 - 4\beta_0 \beta_2 > 0; \\ R_1 m^2 - R_2 > 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.51)$$

Рассмотрим регулирование распределения воздуха на выемочном участке путем уменьшения аэродинамического сопротивления выработок ветви, требующей увеличения расхода воздуха. Примем, как и для отрицательного регулирования расхода воздуха, при естественном распределении по левой выработке — Q_1 , по правой выработке Q_2 . Заданный расход воздуха $Q_i > Q_1$ можно получить путем уменьшения аэродинамического сопротивления левой выработки.

Для вентиляционной системы в этом случае можно записать систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_2 Q_2^3 &= \beta_0 + \beta_1 (Q_1 + Q_2) + \beta_2 (Q_1 + Q_2)^2; \\ (R_1 - R_{\text{вн}}) Q_1^3 &= R_2 Q_2^3. \end{aligned} \right\} \quad (4.52)$$

где $R_{\text{вн}}$ — величина, на которую необходимо уменьшить аэродинамическое сопротивление левой выработки, кгс/м³.

В системе уравнений (4.52) неизвестными являются $R_{\text{вн}}$ и Q_2 . Из первого уравнения системы (4.52) определяется Q_2 ; из второго $R_{\text{вн}}$:

$$Q_2 = \frac{-(\beta_1 + 2\beta_2 Q_1) \pm \sqrt{\beta_1^2 + 4R_2 (\beta_0 + \beta_1 Q_1 + \beta_2 Q_1^2) - 4\beta_2 \beta_0}}{2(\beta_2 + R_2)}; \quad (4.53)$$

$$R_{\text{вн}} = R_1 - R_2 m'^2, \quad (4.54)$$

где

$$m' = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Из (4.53) имеем

$$\beta_1^2 + 4R_2 (\beta_0 + \beta_1 Q_1 + \beta_2 Q_1^2) > 4\beta_2 \beta_0. \quad (4.55)$$

Критериями возможности регулирования распределения воздуха по заданной глубине путем уменьшения аэродинамического сопротивления выработок ветви, требующей увеличения расхода воздуха, является существование системы неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1^2 + 4R_2 (\beta_0 + \beta_1 Q_1 + \beta_2 Q_1^2) - 4\beta_2 \beta_0 &> 0; \\ R_1 - R_2 m'^2 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.56)$$

Рассмотрим регулирование распределения воздуха с помощью вспомогательного вентилятора. При естественном распределении воздуха расходы воздуха по выработкам: левой — Q_1 , правой — Q_2 . Необходимо по левой выработке увеличить расход воздуха $Q_1 > Q_2$. Это увеличение можно получить путем установки на этой выработке вспомогательного вентилятора производительностью $Q_3 \geq Q_1$. Для определения депрессии вспомогательного вентилятора необходимо решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_2 Q_2^3 &= \beta_0 + \beta_1 (Q_1 + Q_2) + \beta_2 (Q_1 + Q_2)^2; \\ R_1 Q_1^3 - h_p &= R_2 Q_2^3. \end{aligned} \right\} \quad (4.57)$$

где h_p — расчетная депрессия вспомогательного вентилятора, кгс/м³.

Из первого уравнения определяется Q_2 .

Затем находится расчетная депрессия

$$h_p = R_1 Q_1^3 - R_2 Q_2^3. \quad (4.58)$$

Депрессия вентилятора должна быть

$$h_v \geq h_p. \quad (4.59)$$

Выбрав вспомогательный вентилятор (характеристику которого можно описать уравнением $h_0 = b_0 - b_2 Q_2^2$, можно уточнить режим совместной работы главного и вспомогательного вентиляторов. С этой целью необходимо решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_2 Q_2^2 &= h_0 + \beta_1 (Q_1 + Q_2) + \beta_2 (Q_1 + Q_2)^2, \\ R_1 Q_1^2 - b_0 + b_2 Q_1^2 &= R_2 Q_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (4.60)$$

В системе уравнений неизвестными являются Q_1 и Q_2 . Решением системы (4.60) уточняется распределение воздуха после установки вспомогательного вентилятора.

Для решения системы уравнений можно воспользоваться методом линеаризации. От системы уравнений (4.60) можно перейти к одному уравнению, которое может решаться методом итераций.

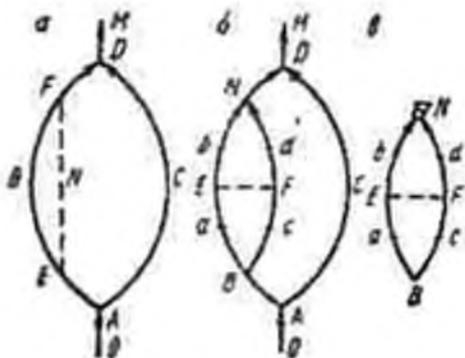


Рис. 4.4. Схемы упрощения вентиляционной систем при расчете регулирования распределения воздуха за счет дополнительного разветвления сети

Рассмотрим регулирование распределения воздуха в пределах выемочного участка, входящего в вентиляционную систему, путем дополнительного разветвления вентиляционной сети. Для выработок выемочного участка дополнительное разветвление можно получить путем проведения новой параллельной выработки или путем превращения (с помощью новой выработки) параллельного соединения в диагональное.

Расчет значительно упрощается при использовании метода предварительного упрощения вентиляционной системы. Рассмотрим случай дополнительного разветвления вентиляционной сети за счет проведения параллельной выработки (рис. 4.4. а). Чтобы получить по направлению ABD расход воздуха $Q_1 > Q_1$, левая ветвь параллельного соединения получает дополнительное разветвление за счет проведения выработки ENF с сопротивлением R_A . Если место заложения выработки известно, то, воспользовавшись формулой для определения сопротивления параллельного соединения, получим

$$R_A = \frac{R_1^2 - R_1 R_{\text{гв}}}{(V R_1 - V R_1 - R_{\text{гв}})^2}, \quad (4.61)$$

где R_i — аэродинамическое сопротивление выработки EBF , кгс $\text{с}^2/\text{м}^3$;

$R_{\gamma\mu}$ — величина, на которую уменьшается аэродинамическое сопротивление ветви ABD за счет дополнительного разветвления, определяется по формуле (4.54).

Аэродинамическое сопротивление параллельного сближения

$$R_{\text{злс}} = R_i - R_{\gamma\mu} \quad (4.62)$$

Значение $R_{\gamma\mu}$, подсчитанное по формуле (4.61), позволяет найти параметры выработки ENF .

Для дополнительного разветвления сети можно использовать подземные вентиляционные скважины. Обычно они бурятся между двумя геометрически параллельными выработками (штреками на сближенных пластах, откаточным и вентиляционным штреками, откаточным и вентиляционным квершлагами и т. д.). В этом случае возникает задача определения места заложения вентиляционной скважины, обеспечивающего заданное перераспределение воздуха. Так как длина и диаметр скважины обычно не меняются, т. е. $R_{\lambda} = R_{\text{сва}} = \text{const}$, появляется возможность определить аэродинамическое сопротивление выработки R_i , к которой примыкает скважина, и в конечном итоге найти точки примыкания скважины ENF (рис. 4.4. а) к выработке ABD , т. е. точки E и F .

Сопротивление R_i можно определить из выражения

$$\frac{1}{\sqrt{R_i - R_{\gamma\mu}}} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{\sqrt{R_{\text{сва}}}} \quad (4.63)$$

После двойного возведения левой и правой частей в квадрат и соответствующих преобразований получим уравнение четвертой степени относительно R_i :

$$R_i^4 - 2AR_i^3 + BR_i^2 - 2CR_i + D = 0, \quad (4.64)$$

где

$$A = 2R_{\text{сва}} + R_{\gamma\mu}; \quad B = R_{\gamma\mu}^2 + 6R_{\text{сва}}R_{\gamma\mu};$$

$$C = R_{\text{сва}}R_{\gamma\mu}^2; \quad D = R_{\text{сва}}^2R_{\gamma\mu}.$$

Уравнение (4.64) решается приближенным методом Ньютона; $R_{\gamma\mu}$ определяется по формуле (4.54). Значение R_i позволяет определять длину выработки EBF . Так, если скважина бурится между откаточным и вентиляционным штреками, то расстояние места заложения скважины от лавы определяется по формуле

$$l = \frac{R_i - R_{\lambda}}{R_{\text{в. ш. в}} + R_{\text{в. ш. в}}}, \quad (4.65)$$

R_a — аэродинамическое сопротивление лампы, кгс с²/м⁶.

$R_{a,м.в.}$; $R_{в.м.в.}$ — удельные аэродинамическое сопротивление откаточного и вентиляционного штреков, кгс с²/м⁶.

Рассмотрим способ регулирования распределения воздуха путем уменьшения аэродинамического сопротивления направления, требующего увеличения расхода воздуха за счет превращения параллельного соединения в диагональное с помощью подземной вентиляционной скважины (рис. 4.4, б).

Будем считать, что скважина закладывается между геометрически параллельными выработками на участках $[a, b]$ и $[c, d]$ равной длины ($l_1 = l_2$). При этом $R_{сум} = const$. Зная интервал, на котором закладывается скважина, можно установить направление движения воздуха по скважине. Если система неравенств

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{21}}{R_{12} + R_{22}} &> \frac{R_{21}}{R_{22} + R_{22}}; \\ \frac{R_{21} + R_{22}}{R_{12}} &> \frac{R_{21} + R_{22}}{R_{22}} \end{aligned} \right\} \quad (4.66)$$

соблюдается, то при любом положении скважины на интервале $[a, b]$ воздух движется от точки F к точке E . В неравенствах (4.66) R_{21} ; R_{12} ; R_{22} ; R_{21} ; R_{22} ; R_{22} — аэродинамические сопротивления выработок Ba, ab, bN, Bc, cd, dN , кгс с²/м⁶. При изменении знака обоих неравенств (4.66) направление движения воздуха по диагонали меняется на обратное, т. е. от точки E к точке F .

Если меняется знак в одном из неравенств, то направление движения воздуха по скважине меняется при перемещении ее места заложения от a к b . Положение скважины, при котором движение воздуха по ней отсутствует, находится из уравнения

$$\frac{R_{21} + xR_{21a}}{(1-x)R_{22a} + R_{22}} = \frac{R_{21} + xR_{21a}}{(1-x)R_{21a} + R_{22}}, \quad (4.67)$$

где R_{21a} ; R_{22a} — удельные аэродинамические сопротивления выработок ab и cd , кгс с²/м⁶;

x — расстояние от точек a и c до условной скважины, по которой движение воздуха отсутствует, м.

Из (4.67) имеем

$$x = \frac{R_{21}R_{22} + R_{21}R_{22} - R_{21}R_{22} - R_{21}R_{22}}{R_{22a}R_{22} - R_{21}R_{22a} + R_{21a}R_{22} - R_{22a}R_{21} + R_{21}R_{22a} - R_{22a}R_{22}} \quad (4.68)$$

Пусть воздух по скважине движется от точки F к точке E , тогда вентиляционная система, приведенная к виду на рис. 4.4, a , описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_{21}Q_{11}^2 + R_{22,0y}Q_{11}^2 + R_{22,0}(l-y)(Q_{11} + Q_{cav})^2 + \\ + R_{23}(Q_{11} + Q_{cav})^2 - h_0; \\ R_{31}(Q_1 - Q_{11})^2 + R_{22,0y}(Q_1 - Q_{11})^2 + R_{cav}Q_{cav}^2 = \\ = R_{21}Q_{11}^2 + R_{22,0y}Q_{11}^2; \\ R_{cav}Q_{cav}^2 + R_{22,0}(l-y)(Q_{11} + Q_{cav})^2 + R_{23}(Q_{11} + Q_{cav})^2 = \\ = R_{22,0}(l-y)(Q_1 - Q_{11} - Q_{cav})^2 + R_{23}(Q_1 - Q_{11} - Q_{cav})^2. \end{aligned} \right\} (4.69)$$

где Q_{11} ; Q_{cav} — расходы воздуха по выработкам BE и EF , м³/с;
 R_{cav} — аэродинамическое сопротивление скважины, кгс с³/м⁴.

y — расстояние от точки a до места заложения скважины, м;

h_0 — фиксированная депрессия приведенного в точку N вентилятора при расходе воздуха Q_1 , кгс/м²; определяется по данным таблицы трансформации координат точек при известном значении Q_1 [по формуле (4.20)].

Система уравнений (4.69) решается относительно Q_{11} ; Q_{cav} ; y методом линеаризации.

Обозначив расходы воздуха по выработкам BE — Q_{11} ; EN — Q_{12} , вентиляционную систему на рис. 4.4, a можно описать системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_{21}Q_{11}^2 + R_{22,0y}Q_{11}^2 + R_{22,0}(l-y)Q_{12}^2 + R_{23}Q_{12}^2 - h_0; \\ R_{31}(Q_1 - Q_{11})^2 + R_{22,0y}(Q_1 - Q_{11})^2 + \frac{Q_{12} - Q_{11}}{|Q_{12} - Q_{11}|} \times \\ \times R_{cav}(Q_{12} + Q_{11})^2 = R_{21}Q_{11}^2 + R_{22,0y}Q_{11}^2; \\ \frac{Q_{12} - Q_{11}}{|Q_{12} - Q_{11}|} R_{cav}(Q_{12} - Q_{11})^2 + R_{22,0}(l-y)Q_{12}^2 + \\ + R_{23}Q_{12}^2 = R_{22,0}(l-y)(Q_1 - Q_{12})^2 + R_{23}(Q_1 - Q_{12})^2. \end{aligned} \right\} (4.70)$$

Система уравнений решается относительно Q_{11} , Q_{12} , y методом последовательных приближений без предварительного определения направления движения воздуха по выработке FE .

4.6 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ВЕНТИЛЯЦИИ

Расчет вредного влияния тепловой депрессии, возникающей при попадании нагретого пожаром воздуха в наклонные (вертикальные) выработки с нисходящим движением воздуха, в том

числе при пожарах в этих выработках, на вентиляцию выемочного участка с целью предупреждения самопроизвольного изменения направления движения воздуха, расчеты, связанные с локальным реверсированием воздушной струи и другими местными вентиляционными маневрами, решение ряда других задач аварийного проветривания должны производиться с учетом вентиляционных систем шахт.

Метод предварительного упрощения вентиляционных систем значительно упрощает расчеты аварийной вентиляции.

Поэтому задача, которая может решаться до возникновения аварии, упрощенная вентиляционная система может быть предварительно подключена для каждого выемочного участка с целью использования ее во время аварии для решения экстренных задач по оперативному управлению вентиляцией выемочного участка.

Борьба с вредным влиянием тепловой депрессии в наклонных выработках имеет два этапа. На первом этапе необходимо предотвратить опрокидывание воздушной струи. Вторым этапом является после опрокидывания воздушной струи. На этом этапе необходимо уменьшить опасность опрокинутой струи.

Для определения расхода воздуха Q , проходящего по наклонной выработке во время пожара с учетом вредного влияния тепловой депрессии, вентиляционная система упрощается до вида одной (наклонной) выработки (или последовательного соединения выработок) с приведением вентилятора в конечную точку по ходу струи. Этот расход воздуха определяется из уравнения

$$\beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 Q^2 = R_2 Q^2 + h_2, \quad (4.71)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ — постоянные коэффициенты, входящие в уравнение, описывающее характеристику приведенного в конечную точку вентилятора;

h_2 — тепловая депрессия, кгс·м²;

R_2 — аэродинамическое сопротивление упрощенной вентиляционной сети, кгс·с²·м⁶.

Если уравнение (4.71) имеет положительный корень, находящийся в пределах существования эмпирической формулы, описывающей характеристику приведенного вентилятора ($A < Q < B$), то опрокидывание воздушной струи в наклонной выработке не наступит.

Если тепловая депрессия возникает на левой ветви, то регулятор должен устанавливаться на правой ветви.

Для упрощенной вентиляционной системы с приведенным вентилятором в конечной точке можно записать систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 + \beta_1(Q_1 + Q_2) + \beta_2(Q_1 + Q_2)^2 &= (R_1 + R_2) Q_2^2 \\ R_1 Q_1^2 + h_1 &= (R_1 + R_2) Q_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.72)$$

где $\beta_{0c}; \beta_{1c}; \beta_{2c}$ — постоянные коэффициенты, входящие в уравнение, описывающее характеристику вентилятора, приведенного в точку D ,

$R_1; R_2; R_p$ — аэродинамические сопротивления ветвей параллельного соединения и регулятора, установленного на правой ветви;

$Q_1; Q_2$ — расходы воздуха по левой и правой выработкам после возникновения тепловой депрессии и установки регулятора.

Из системы уравнений (4.72) при известных величинах тепловой депрессии h_p и аэродинамического сопротивления регулятора R_p определяются расходы воздуха Q_1 и Q_2 .

При этом должно соблюдаться условие

$$A_c < Q_1 + Q_2 < B_c, \quad (4.73)$$

т. е. суммарный расход воздуха должен находиться в пределах границ существования эмпирической формулы, описывающей характеристику приведенного в точку D вентилятора.

Система (4.72) решается методом линеаризации.

При заданной величине Q_1 (исходя из условий предупреждения опрокидывания струй) из системы уравнений (4.72) могут определяться R_p и Q_2 .

Движение воздуха по соединению выработок будет наиболее устойчивым, если имеет место минимальный расход энергии. Это положение дает возможность, применив метод множителей Лагранжа, одновременно с расчетом распределения воздуха определить эквивалентное отверстие регулятора.

Минимизируемая функция будет

$$z = R_1 Q_1^3 + h_p Q_1 + \left(R_p + \frac{0,144}{A_p^5} \right) Q_2^3, \quad (4.74)$$

где A_p — эквивалентное отверстие регулятора, м².

В качестве уравнений связи будут уравнения системы (4.72) (после замены $R_p = \frac{0,144}{A_p^5}$).

Введем вспомогательную функцию

$$\begin{aligned} F = & R_1 Q_1^3 + h_p Q_1 + \left(R_p + \frac{0,144}{A_p^5} \right) Q_2^3 + \lambda_1 \left[R_1 Q_1 + \right. \\ & \left. + h_p - \left(R_p + \frac{0,144}{A_p^5} \right) Q_2 \right] + \lambda_2 \left[\beta_{0c} + \beta_{1c} (Q_1 + Q_2) + \right. \\ & \left. + \beta_{2c} (Q_1 + Q_2)^2 - \left(R_p + \frac{0,144}{A_p^5} \right) Q_2 \right]. \end{aligned} \quad (4.75)$$

Найдя частные производные и приравняем их нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial Q_1} = 3R_1 Q_1 + \lambda_1 + 2\lambda_2 R_2 Q_1 + \lambda_2 (\beta_{1c} + 2\beta_{2c} (Q_1 + Q_2)) = 0; \quad (4.76)$$

$$\frac{\partial F}{\partial Q_2} = 3\left(R_2 + \frac{0.144}{A_p^2}\right) Q_2 - 2\lambda_2 \left(R_2 + \frac{0.144}{A_p^2}\right) Q_2 + \lambda_2 \left[\beta_{1c} + 2\beta_{2c} (Q_1 + Q_2) - 2\left(R_2 + \frac{0.144}{A_p^2}\right) Q_2\right] = 0; \quad (4.77)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_2} = -\frac{0.288}{A_p^2} Q_2 + \frac{0.288\lambda_1 Q_1}{A_p^2} + \frac{0.288\lambda_2 Q_1}{A_p^2} = 0. \quad (4.78)$$

Значения переменных Q_1 , Q_2 , λ_1 , λ_2 определяются из системы уравнений (4.76), (4.77), (4.78).

Система уравнений решается методом линеаризации.

Достаточные условия существования минимума функции (4.74) следуют из физической сущности задачи.

Для уменьшения предного влияния опрокинутой струи (когда опрокидывание произошло или предотвратить его невозможно) нужно производить изоляцию наклонных выработок противопожарными дверями или с помощью перемычек.

Известна формула для определения температуры воздуха в сухой горной выработке при известной температуре в начальной точке

$$t_L = t_{\text{гор}} + (t_n - t_{\text{гор}}) e^{-\frac{\lambda_2 U L}{G}}, \quad (4.79)$$

где t_L — температура воздуха на расстоянии L от начальной точки, °С;

$t_{\text{гор}}$ — температура горных пород, °С;

t_n — температура воздуха и газов в начале выработки, °С;

U — диаметр выработки, м;

L — расстояние от начала выработки, м;

λ_2 — коэффициент нестационарного теплообмена между газом и горным массивом;

G — часовой расход воздуха, кгс/ч;

c — теплоемкость воздуха, ккал/кгс.

Для определения величины тепловой депрессии воспользуемся формулой

$$h_1 = (p_1 - p_2) 13.6, \text{ кгс/м}^2. \quad (4.80)$$

где p_1 , p_2 — давление воздуха в точках оснований двух столбов воздуха с разным удельным весом, расположенных на одной горизонтальной плоскости, мм рт. ст.

На расстоянии dH от начальной точки давление будет

$$p_2 = p_1 + \gamma dH, \quad (4.81)$$

где γ — удельный вес воздуха.

В этом же сечении должно быть уравновешивающее давление, направленное снизу вверх,

$$p'_a = p_p + dp \quad (4.82)$$

Из уравнений (4.81) и (4.82) следует

$$\frac{dp}{\gamma} = dH. \quad (4.83)$$

Исходя из уравнения состояния газа

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{RT}{p}, \quad (4.84)$$

где R — газовая постоянная;

T — температура, К,

уравнение (4.83) запишется

$$\frac{dH}{RT} = \frac{dp}{p}. \quad (4.85)$$

Подставив значение l_L согласно (4.79), получим

$$\frac{\frac{k_1 U \left(\frac{H}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{e \cdot \alpha} dH}{R \left[T_{\text{гор}}^2 \frac{k_1 U \left(\frac{H}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{\alpha} + (T_0 - T_{\text{гор}}) \right]} = \frac{dp}{p}, \quad (4.86)$$

где L_0 — расстояние от очага пожара до наклонной выработки, м,

α — угол между горизонтальной плоскостью и наклонной выработкой;

$T_{\text{гор}}$ — температура горных пород, К;

T_0 — принимается равной температуре очага пожара.

Получено дифференциальное уравнение (4.86) с разделяющимися переменными. Общее решение дифференциального уравнения (4.86) будет

$$\int \frac{\frac{k_1 U \left(\frac{H}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{e \cdot \alpha} dH}{R \left[T_{\text{гор}}^2 \frac{k_1 U \left(\frac{H}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{\alpha} + (T_0 - T_{\text{гор}}) \right]} = \int \frac{dp}{p} + C_1 \quad (4.87)$$

После двух подстановок

$$y = \frac{k_1 U \left(\frac{H}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{\alpha};$$

$$z = T_{\text{гор}}^2 + (T_0 - T_{\text{гор}})$$

в интегрировании общее решение приводится к виду

$$\ln p = \frac{Gc \sin \alpha}{k_f U R T_{\text{пор}}} \ln \left[T_{\text{пор}} e^{\frac{k_f U \left(\frac{H}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{Gc}} + (T_n - T_{\text{пор}}) \right] + C_1 \quad (4.88)$$

Решим задачу Коши. Так как при $H = 0$, $p = p_n$, то

$$C_1 = \ln p_n - \frac{Gc \sin \alpha}{k_f U R T_{\text{пор}}} \ln \left[T_{\text{пор}} e^{\frac{k_f U L_0}{Gc}} + (T_n - T_{\text{пор}}) \right] \quad (4.89)$$

в уравнение (4.88) запишется

$$\ln p - \ln p_n = \frac{Gc \sin \alpha}{k_f U R T_{\text{пор}}} \left(\ln \left[T_{\text{пор}} e^{\frac{k_f U \left(\frac{H_A}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{Gc}} + (T_n - T_{\text{пор}}) \right] - \ln \left[T_{\text{пор}} e^{\frac{k_f U L_0}{Gc}} + (T_n - T_{\text{пор}}) \right] \right) \quad (4.90)$$

Давление в точке А будет

$$p_A = p_n \left[\frac{T_{\text{пор}} e^{\frac{k_f U \left(\frac{H_A}{\sin \alpha} + L_0 \right)}{Gc}} + (T_n - T_{\text{пор}})}{T_{\text{пор}} e^{\frac{k_f U L_0}{Gc}} + (T_n - T_{\text{пор}})} \right]^{\frac{Gc \sin \alpha}{k_f U R T_{\text{пор}}}} \quad (4.91)$$

где H_A — расстояние по вертикали от начальной точки на наклонной выработке до точки А.

Для определения максимальной тепловой депрессии принимаем момент, когда нагретые в очаге пожара газы полностью вытесняют наклонную (вертикальную) выработку с исходящим движением воздуха, но не успеют поступить в наклонную (вертикальную) выработку с восходящим движением воздуха.

Следовательно, для наклонной выработки с восходящим движением воздуха применяется изотермический закон изменения состояния воздуха, при котором давление в точке В подсчитывается по формуле

$$p_B = (p_n - \sum h) e^{\frac{H}{RT_{\text{ср}}}} \quad (4.92)$$

где $\sum h$ — суммарная депрессия выработок между начальными точками двух параллельных наклонных выработок, расположенных на одной геодезической высоте, кгс/м²;

$T_{\text{ср}}$ — средняя температура воздуха в наклонной выработке с исходящей струей, К.

При подсчете депрессий выработок с нагретым воздухом, входящим в $\sum h$, необходимо производить пересчет коэффициента α с учетом изменения удельного веса воздуха.

Расчетная формула для определения максимальной величины тепловой депрессии будет

$$h_T = \left\{ 13,6 \left(p_a - \frac{\sum h}{13,6} \right) e^{\frac{H_A}{RT_{cp}}} - \right. \\ \left. - p_a \left[\frac{T_{пор} e^{\frac{\lambda_1 U \left(\frac{H_A}{\sin \alpha} + L_1 \right)}{Gc}} + (T_a - T_{пор})}{T_{пор} e^{\frac{\lambda_1 U L_0}{Gc}} + (T_a - T_{пор})} \right]^{\frac{G \sin \alpha}{\lambda_1 U R T_{пор}}} \right\} \cdot \text{кгс/см}^2. \quad (4.93)$$

При расчете вентиляции выемочного участка в режиме локального реверсирования воздушной струи необходимо произвести упрощения сети с исключением всех выработок, не относящихся к выемочному участку, и приведением вентилятора в конечную точку выемочного участка, общую для нормальной и реверсивной схем проветривания участка.

4.7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Описать характеристику приведенного вентилятора с помощью точечного способа наименьших квадратов.

Рассматривается упрощенная вентиляционная система с приведением вентилятора серии К-0,6 типа ВОКД с диаметром колеса 1,8 м, частотой вращения 1000 об/мин, углом установки лопаток 45°. Координаты десяти точек приведенного вентилятора: 1) (-28, 85; 331, 35); 2) (-19,34; 293,69), 3) (-2,19; 224,63); 4) (3,94; 201,31); 5) (10,56; 176,69); 6) 18,03; 149,64); 7) (26,32; 121,24); 8) (36,34; 89,32); 9) (48,78; 54,94), 10) (63,37; 24,39).

Составим вспомогательную табл. 4.3.

Для описания характеристики приведенного вентилятора прием аппроксимирующий полином вида

$$h = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 Q^2 + \beta_3 Q^3. \quad (4.94)$$

По данным табл. 4.3 составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 7\beta_0 + 207,34\beta_1 + 8860,8\beta_2 + 443873,64\beta_3 &= 817,63; \\ 207,34\beta_0 + 8860,8\beta_1 + 443873,64\beta_2 + 24130506,56\beta_3 &= \\ &= 16019,51; \\ 8860,80\beta_0 + 443873,64\beta_1 + 24130506,56\beta_2 + \\ &+ 1376159994,83\beta_3 = 502089,36; \\ 443873,64\beta_2 + 24130506,56\beta_3 + 1376159994,83\beta_3 + \\ &+ 80903228724,92\beta_3 = 201782224,55 \end{aligned} \right\} (4.95)$$

Q^*	Q	Q^*	Q^*	Q^*	Q^*
1	3,94	15,52	61,18	240,93	949,28
1	10,56	111,51	1177,55	12434,93	131312,86
1	18,03	325,08	5861,19	105677,26	1906361,00
1	26,32	692,74	18232,92	479890,45	12630716,64
2	36,34	1320,60	47990,60	1743978,40	63376175,01
1	48,78	2379,49	116071,62	5661968,74	276190835,14
1	63,37	4015,76	254478,71	16126315,85	1021924644,92
1	207,34	8860,80	443873,64	24130506,66	1376159994,83

Разделим все коэффициенты уравнений на коэффициент при β_0 , тогда система запишется

$$\left. \begin{aligned} A_0 + 29,62\beta_1 + 1265,83\beta_2 + 63410,53\beta_3 &= 116,79; \\ A_0 + 42,73\beta_1 + 2140,86\beta_2 + 116380\beta_3 &= 77,26; \\ A_0 + 50,09\beta_1 + 2723,2\beta_2 + 165570\beta_3 &= 56,66; \\ A_0 + 54,36\beta_1 + 3100,5\beta_2 + 182270\beta_3 &= 45,46. \end{aligned} \right\} (4.96)$$

Решим систему уравнений методом исключения неизвестных Гаусса:

$$\begin{aligned} &\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 29,62 & 1265,83 & 63410,53 & 116,79 \\ & 42,73 & 2140,86 & 116380 & 77,26 \\ & 50,09 & 2723,20 & 165570 & 56,66 \\ & 54,36 & 3100,50 & 182270 & 45,46 \end{array} \right) \xrightarrow{2} \\ &\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 29,62 & 1265,83 & 63410,53 & 116,79 \\ 0 & 13,11 & 874,97 & 52969,47 & -39,53 \\ 0 & 0 & 91,20 & 19452,89 & 1,48 \\ 0 & 0 & 0 & -20244,35 & 0,17 \end{array} \right) \end{aligned}$$

- Система уравнений в треугольном виде будет:

$$\left. \begin{aligned} A_0 + 29,62\beta_1 + 1265,83\beta_2 + 63410,53\beta_3 &= 116,79; \\ 13,11\beta_1 + 874,97\beta_2 + 52969,47\beta_3 &= -39,53; \\ 91,2\beta_2 + 19452,89\beta_3 &= 1,48; \\ -20244,35\beta_3 &= 0,17 \end{aligned} \right\} (4.97)$$

$$\beta_3 = -8,4 \cdot 10^{-2}; \quad \beta_2 = 1,8 \cdot 10^{-2}; \quad \beta_1 = 4,18; \quad \beta_0 = 218,35.$$

Как видно, характеристику приведенного вентилятора можно с достаточной точностью описать уравнением

$$h = 218,35 - 4,18Q + 0,018Q^2. \quad (4.98)$$

Пример 2. Упростить вентиляционную систему и рассчитать распределение воздуха по выработкам.

Решение производится для вентиляционной системы, приведенной на рис. 4.1, а. В точке в располагается вентилятор ВОКД-1,5

Таблица 4.3

Q^*	h	Q_1	Q_{1A}	Q_{1B}
3740,00	201,31	793,16	3124,33	12310,11
1386663,80	176,69	1865,65	19702,70	208061,31
34357658,83	149,61	2698,01	48644,97	877068,47
332440460,21	121,24	3191,04	83987,80	2216650,22
2303090199,50	89,39	3245,89	117955,99	4286520,39
13472588931,30	54,94	2679,97	130729,18	6376969,31
64759365070,50	24,39	1845,89	97944,39	6206735,74
80903228724,92	817,53	16019,51	802089,36	20178224,55

($n = 980$ об/мин) при угле установки лопаток 25° . Координаты девяти точек, расположенных на характеристике вентилятора, приведены в табл. 4.1. По выработкам $3-b-f$ и $1-9-12-b$ расходы воздуха заданы. $Q_{3b1} = 3$ м³/с, $Q_{10131} = 8$ м³/с.

Аэродинамические сопротивления выработок (кгс·с²/м⁴):

$$R_{n2} = 15, R_{72} = 0.01, R_{01} = 0.06, R_{a1} = 0.1;$$

$$R_{12} = 0.07, R_{22} = 0.1, R_{23} = 2.0, R_{24} = 0.05,$$

$$R_{13} = 0.05, R_{222} = 0.2.$$

В табл. 4.4 произведена трансформация координат точек при преобразованиях системы от вида, изображенного на рис. 4.1, а, до вида на рис. 4.1, б.

Для описания характеристики вентилятора, приведенного в узел f (см. рис. 4.1, б) уравнением вида (4.17), воспользуемся методом средних, базирующимся на выравнивании кривой, при котором обеспечивается равенство нулю алгебраической суммы отклонений (вычисленных по формуле значений функции) от фактических значений функции.

При определении коэффициентов формулы (4.17) фиксируется одна из точек ($Q_0; h_0$) и используется уравнение прямой линии

$$\frac{h-h_0}{Q-Q_0} = (\beta_1 - \beta_2 Q_0) + \beta_2 Q_1 \quad (4.99)$$

Фиксируем точку $h_0 = 149.74$, $Q_0 = -2.58$. Вспомогательные расчеты сводим в табл. 4.5

Для определения коэффициентов β_1 и β_2 на базе табл. 4.4 составим два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} -41.94 &= 3(\beta_1 + \beta_2 Q_0) + 1.29\beta_2 \\ -47.23 &= 3(\beta_1 + \beta_2 Q_0) + 16.77\beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.100)$$

Отсюда:

$$\beta_1 = -0.34, \quad \beta_2 = -14.71; \quad \beta_0 = 113.75.$$

Состояние трансформации точки	Точки на характеристике							
	1		2		3		4	
	Q_1	h_1	Q_2	h_2	Q_3	h_3	Q_4	h_4
Координаты точек на характеристике вентилятора	22	225	23	217	24	207	25	195
Приведение вентилятора в узел 7 с исключением выработок 7-8	22	220,16	23	211,71	24	201,24	25	188,75
Исключение аэриона у входа воздуха	18,17	220,16	19,24	211,71	20,34	201,24	21,45	188,75
Приведение вентилятора в узел 6 с исключением выработок 0-1 и 6-7	18,17	167,34	19,24	152,48	20,34	135,05	21,45	115,13
Исключение аэриона 1-3-12-6	10,17	167,34	11,24	152,48	12,34	135,05	13,45	115,13
Приведение в узел 5 с исключением выработок 1-2 и 5-6	10,17	149,76	11,24	131,00	12,34	109,16	13,45	84,38
Исключение выработок 2-5	0,42	149,76	1,94	131,00	3,36	109,16	4,99	84,38
Приведение в узел 4 с исключением выработок 2-3 и 4-5	0,42	149,74	1,94	130,59	3,36	107,92	4,99	80,64
Исключение выработок 3-6-1	-2,58	149,74	-1,06	130,59	0,36	107,92	1,99	80,64

Итак, уравнение, описывающее характеристику приведенного вентилятора, будет

$$h = 113,75 - 14,71Q - 0,34Q^2.$$

$$Q_{312} = \frac{-14,71 + \sqrt{14,71^2 - 4(R_{312} + 0,34)(-113,75)}}{2(0,2 + 0,34)} = 6,29;$$

$$h_{312} = R_{312}Q_{312}^2 = 7,91;$$

$$Q_{212} = Q_{21} = Q_{11} = Q_{312} + Q_{314} = 9,29;$$

$$h_{21} = h_{21} + h_{312} + h_{12} = 17,4.$$

Таблица 4.5

Q	$Q - Q_1$	h	$h - h_1$	$\frac{h - h_1}{Q - Q_1}$	Q'	$\beta_1 Q'$	$\rho_1 Q'$	h_p
-1,06	1,52	130,59	-19,15	-12,60	1,12	-0,38	+15,59	128,96
0,36	2,94	107,92	-41,82	-14,22	0,13	-0,04	-5,00	108,71
1,99	4,57	80,64	-69,10	-15,12	3,96	-1,35	-29,27	83,13
3,84	0,42	51,16	-98,58	-16,35	14,76	-5,01	-56,49	52,25
5,49	8,07	22,87	-126,87	-15,72	30,14	-10,25	-80,76	22,74
7,44	10,02	-12,17	-161,91	-16,16	55,35	-16,82	-109,44	-14,51

статка вентилятора									
1		6		7		8		9	
Q_1	h_1	Q_6	h_6	Q_7	h_7	Q_8	h_8	Q_9	h_9
26	182	27	170	28	155	29	135	30	100
26	175,24	27	162,71	28	147,16	29	126,59	30	91
22,68	175,24	23,71	162,71	24,87	147,16	26,10	126,59	27,54	91
22,68	92,94	23,71	72,76	24,87	48,20	26,10	17,60	27,54	-30,35
14,68	92,94	15,71	72,76	16,87	48,20	18,10	17,60	19,54	-30,35
14,68	56,31	15,71	30,80	16,87	-0,18	18,10	-38,09		
6,84	56,31	8,49	30,80	10,44	-0,18	13,05	-38,09		
6,84	51,16	8,49	22,87	10,44	-12,27	-	-		
3,84	51,16	5,49	22,87	7,44	-12,17	-	-		

Расход воздуха по соединению 2—5 определяется интерполированием

$$Q_{25} = Q_{27} = Q_{29} = 16,21 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Расход воздуха по выработке 2—5

$$Q_{25} = Q_{27} - Q_{29} = 6,92.$$

Расход воздуха по соединению 1—6

$$Q_{16} = Q_{27} - Q_{29} = Q_{25} + Q_{25,126} = 24,21.$$

Депрессии сети до точки 7

$$h_{07} = (R_{01} + R_{07}) Q_{17}^2 + (R_{12} + R_{26}) Q_{16}^2 + h_{26} = 155,85.$$

Производительность вентилятора определяется интерполированием

$$Q_{17} = Q_7 = 27,42.$$

Внешние утечки воздуха

$$Q_{с.у} = Q_{17} - Q_{16} = 3,21 \text{ м}^3/\text{с.}$$

2 РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ НЕКОТОРЫХ СЛУЧАЯХ ОБЪЕДИНЕНИЯ ШАХТ

5.1. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ОБЪЕДИНЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Решение задач по объединению шахт целесообразно проводить после упрощения вентиляционных сетей до однолинейного вида. Такое упрощение в отдельных случаях возможно выполнить с помощью известных способов замены соединений горных выработок, входящих в сеть, выработками равного сопротивления. С этой же целью предлагается также использовать табличный метод предварительного упрощения вентиляционных систем, описанный в главе 4.

Задача решается при неизвестном направлении движения воздуха по соединяющей выработке. По результатам депрессионных съемок на каждой из объединяемых шахт направление движения воздуха по соединяющей выработке легко установить путем сравнения давлений в точках пересечений с соединяющей выработкой. При изменении режима работы хотя бы одного из вентиляторов объединяемой вентиляционной системы направление движения воздуха по соединяющей выработке может измениться и его можно определить только расчетом.

Перед объединением шахт в одну вентиляционную систему должен производиться расчет распределения воздуха по выработкам системы. Расчет может производиться с предварительным упрощением вентиляционных систем. Объединенная вентиляционная система при четырех вентиляторах приводится к виду, представленному на рис. 5.1.

В точках 1, 2, 3, 4 расположены вентиляторы. Выработка 4—5 соединяет две вентиляционные системы.

Для решения задачи распределения воздуха необходимо учесть направление движения воздуха по соединяющей выработке, что можно сделать двумя путями. Первый путь — предварительное определение направления движения по соединяющей выработке. С этой целью определяется количество воздуха, которое будет проходить по выработкам упрощенных вентиляционных систем. Для каждой вентиляционной системы решается одно или система уравнений (число уравнений определяется числом вентиляторов в системе)

относительно количества воздуха. Подсчитывается депрессия выработок двух систем от начальных точек до точек примыкания соединившей выработки. Ввиду по соединившей выработке будет проходить в сторону выработок системы с большей величиной указанной депрессии.

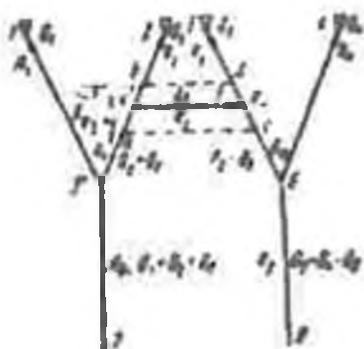


Рис. 5.1. Схема объединенной вентиляционной системы при горизонтальном направлении соединившей вентиляционной выработки

При втором пути система уравнений, описывающая объединяемую вентиляционную систему, составляется с учетом возможного изменения направления движения воздуха по соединившей выработке.

Для соединения, представленного на рис. 5.1, при направлении движения воздуха по соединившей выработке от точки 4 до точки 5 система уравнений запишется:

$$\left. \begin{aligned}
 R_1(Q_3 + Q_4)^2 + R_2Q_1^2 - \beta_{11} - \beta_{12}Q_1 + \beta_{21}Q_1^2; \\
 R_3(Q_3 + Q_4)^2 + R_4Q_1^2 + R_5Q_2^2 - \beta_{22} - \beta_{13}Q_3 - \beta_{23}Q_1^2; \\
 R_6(Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_1)^2 + R_{10}(Q_3 + Q_5 - Q_1)^2 + R_7Q_1^2 - \\
 - \beta_{30} + \beta_{14}Q_3 + \beta_{24}Q_1^2; \\
 R_8(Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_1)^2 + R_9Q_1^2 - \beta_{40} + \beta_{15}Q_1 + \beta_{25}Q_1^2; \\
 R_9(Q_3 + Q_4)^2 + R_7Q_1^2 + \frac{Q_3 - Q_5}{|Q_3 - Q_5|} R_4(Q_3 - Q_5)^2 - R_1(Q_3 + Q_4 + \\
 + Q_5 + Q_4)^2 + R_{10}(Q_3 + Q_5 - Q_1)^2.
 \end{aligned} \right\} (5.1)$$

$$\left. \begin{aligned}
 A_i < Q_i < B_i \\
 i = 1, 2, 3, 4.
 \end{aligned} \right\} (5.2)$$

где

$\beta_{11}; \beta_{12}; \beta_{21}$ — постоянные коэффициенты в уравнении, описывающем характеристику i -го приведенного вентилятора, $i = 1, 2, 3, 4$;

$$R_6; R_{11}; R_7 = R_1 + R_{01};$$

$$R_2 = R_{12} + R_2;$$

$$R_9; R_{10} = R_{10} + R_{01};$$

$$R_3 = R_{13} + R_3; R_3; R_3$$

— аэродинамические сопротивления выработок 7—3', 3'—1, 3'—4', 4'—2, 8—6, 6—5, 5—3, 6—4, 4'—5, кгс·с²/м³;

Q_i — расходы воздуха через точку расположения i -го вентилятора ($i = 1, 2, 3, 4$), м³/с;

A_i, B_i — нижняя и верхняя границы эмпирической формулы, описывающей характеристику i -го приведенного вентилятора.

В системе уравнений (5.1) принято обозначение Q_6 — расход воздуха по выработке 3'—4', м³/с. Тогда расходы воздуха по другим выработкам будут: по 4'—5—($Q_1 - Q_2$), по 3'—7—($Q_1 + Q_2$), по 6—5—($Q_2 + Q_3 - Q_4$), по 8—6—($Q_2 + Q_1 + Q_2 - Q_4$).

В системе уравнений 5.1 неизвестными являются Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 . Система уравнений решается методом линейзации. Для ускорения процесса итераций предлагается первое приближение брать с учетом (5.2). Задаваясь значениями Q_2 и Q_4 , из четвертого уравнения системы находят первое приближение Q_{21} , после чего из третьего уравнения уточняется Q_{31} . Из второго и пятого уравнений определяется первое приближение Q_{11} . Последующие приближения находят обычным путем.

Одновременно с расчетом распределения воздуха в объединенной вентиляционной системе определяется направление движения воздуха по соединяющей выработке. Если при расчете использовалась система уравнений (5.1), то условием движения воздуха от точки 4 к точке 5 является неравенство $Q_1 - Q_2 > 0$. При $Q_1 - Q_2 < 0$ воздух движется от точки 5 к точке 4.

Если в объединяемой вентиляционной системе число вентиляторов меньше или больше четырех, то уменьшается или увеличивается число уравнений в системе, описывающей объединенную вентиляционную систему.

5.2 РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА

Для усиления проветривания одной из шахт за счет резервов вентиляции другой шахты и заданием места заложения соединяющей выработки в ряде случаев на выработках одной из систем устанавливают регуляторы. Для вентиляционной системы на рис. 5.1 регулятор должен устанавливаться на выработке 8—6. Пусть задано количество воздуха по выработке 4'—5— Q_1 .

тогда одновременно с сопротивлением регулятора R_p определяются производительности приведенных вентиляторов Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . Составляется система уравнений:

$$\begin{aligned}
 R_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 + R_1Q_1^2 &= \beta_{01} + \beta_{11}Q_1 + \beta_{21}Q_1^2; \\
 R_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 + R_7(Q_2 + Q_3)^2 + R_2Q_2^2 &= \beta_{02} + \\
 &+ \beta_{12}Q_2 + \beta_{22}Q_2^2; \\
 (R_9 + R_p)(Q_2 + Q_4 - Q_3)^2 + R_{10}(Q_2 - Q_3)^2 + R_3Q_3^2 &= \\
 &= \beta_{03} + \beta_{13}Q_3 + \beta_{23}Q_3^2; \\
 (R_9 + R_p)(Q_2 + Q_4 - Q_3)^2 + R_1Q_1^2 &= \beta_{04} + \beta_{14}Q_4 + \beta_{24}Q_4^2; \\
 R_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 + R_7(Q_2 + Q_3)^2 + R_2Q_2^2 &= \\
 &= (R_9 + R_p)(Q_2 + Q_4 - Q_3)^2 + R_{10}(Q_2 - Q_3)^2.
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Система уравнений (5.3.) решается методом линейизации.

5.3. РАСЧЕТ МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ СОЕДИНЯЮЩЕЙ ВЫРАБОТКИ

Соединяющая две шахты выработка обычно располагается исходя из условий наиболее рациональной подачи груза к главному стволу. При этом оказывают влияние топология транспортной сети, необходимость соблюдения горизонтальности соединяющей выработки, ее длина и др.

Если по условиям транспорта допускается перемещение соединяющей выработки на каком-то интервале, место расположения выработки может рассчитываться с учетом фактора вентиляции. В отдельных случаях помимо транспортной выработки может быть целесообразным проведение второй соединяющей выработки, используемой только для вентиляции.

Расчет места заложения соединяющей вентиляционной выработки может быть целесообразным при объединении двух вентиляционных систем с различной степенью обеспеченности воздуха каждой из систем. В этом случае появляется возможность выбора такого места заложения выработки, которое обеспечит более интенсивное проветривание выработок одной из объединяемых шахт за счет имеющегося резерва вентилятора главного проветривания другой шахты.

1. Соединяющая выработка горизонтальна и закладывается между двумя параллельными выработками. Так как длина соединяющей выработки постоянная, то постоянно также аэродинамическое сопротивление ее при любом месте расположения выработки. Одновременно с расчетом места заложения соединяющей выработки производится расчет распределения воздуха в объединенной вентиляционной системе.

Рассматривается выбор места заложения соединяющей выработки, обеспечивающей заданное усиление проветривания одной

из шхт за счет имеющегося резерва главного вентилятора другой шхты

По соединяющей выработке воздух перемещается в сторону шхты с резервом вентиляции. Задается один из расходов воздуха, проходящего по соединяющей выработке или по некоторым выработкам шхты, требующей усиления проветривания.

Предположим для объединенной шхты на рис. 5.1 задано количество воздуха Q_1 .

Вентиляционная система на рис. 5.1 описывается системой уравнений.

$$\left. \begin{aligned}
 R_1(Q_1 - Q_2 + Q_3)^2 + R_1 Q_1^2 - \beta_{01} - \beta_{11} Q_1 - \beta_{21} Q_1^2 &= 0, \\
 R_2(Q_1 - Q_2 + Q_3)^2 + R_2(Q_2 + Q_3)^2 + R_{2,0} \times (Q_2 + Q_3)^2 + \\
 + R_{2,0} (1 - \lambda) Q_1^2 + R_2 Q_1^2 - \beta_{02} - \beta_{12} Q_2 - \beta_{22} Q_2^2 &= 0, \\
 R_3(Q_2 + Q_3 - Q_3)^2 + R_{30}(Q_2 - Q_3)^2 + R_{11,0} \times (Q_2 - Q_3)^2 + \\
 + R_{11,0} (1 - \lambda) Q_1^2 - \beta_{03} - \beta_{13} Q_3 - \beta_{23} Q_3^2 &= 0, \\
 R_4(Q_2 + Q_3 - Q_3)^2 + R_4 Q_1^2 - \beta_{04} - \beta_{14} Q_1 - \beta_{24} Q_1^2 &= 0, \\
 R_5(Q_2 + Q_3 + Q_3)^2 + R_5(Q_2 + Q_3)^2 + R_{5,0} \times (Q_2 + Q_3)^2 + \\
 + R_5 Q_1^2 - R_6(Q_2 + Q_3 - Q_3)^2 - R_{60}(Q_2 - Q_3)^2 - \\
 - R_{11,0} \times (Q_2 - Q_3)^2 &= 0.
 \end{aligned} \right\} (5.4)$$

где $R_{2,0}$, $R_{11,0}$ — удельные аэродинамические сопротивления выработок на отрезках $[a, b]$, $[c, d]$. Другие обозначения приняты согласно рис. 5.1.

В системе уравнений (5.4) неизвестными являются Q_2 , Q_3 , Q_4 , λ . Расходы воздуха ограничены по величине.

Система уравнений (5.4). Решается методом линеаризации. Значение λ при первом приближении можно принять равным нулю.

Заданным может быть расход воздуха по выработке 3'—4', если обозначить этот расход воздуха — Q_2 , а расходы воздуха по другим выработкам соответствуют принятым в системе уравнений (5.4). Аналогично случаю, когда задан расход воздуха по выработке 4'—5, составляется система уравнений при новых обозначениях расходов воздуха, которая решается методом линеаризации.

Такой же путь решения задачи при фиксировании расхода воздуха по любой выработке.

2. Соединяющая выработка имеет фиксированную точку примыкания к одной из вентиляционных систем. В данном случае длина соединяющей выработки меняется в зависимости от положения. Соединяющая выработка может быть как горизонтальной, так и наклонной. В качестве соединяющей выработки может использоваться подземная вентиляционная скважина.

Рассмотрим упрощенную объединенную вентиляционную систему, приведенную на рис. 5.2. Соединяющая выработка пересекает выработку 3'—2 в точке 4'. Точка примыкания соединяю-

шей выработки к выработке б—3 может менять свое положение на отрезке [а, б] длиной l . Пусть она располагается на расстоянии x от точки и.

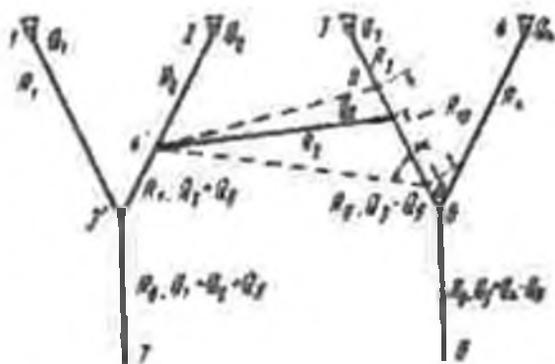


Рис. 5.2. Схема объединенной вентиляционной системы при соединении точки прохода или соединяющей выработки к одной из вентиляционных систем

При заданном расходе воздуха по соединяющей выработке вентиляционная система описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 R_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 - R_1Q_1^2 - R_{01} \cdot \beta_{11}Q_1 - R_{21}Q_1^2 \\
 R_0(Q_2 + Q_3 + Q_4)^2 - R_2(Q_2 - Q_1)^2 - R_3Q_1^2 - \\
 - R_{02} \cdot \beta_{21}Q_2 + R_{22}Q_2^2 \\
 R_0(Q_3 + Q_4 - Q_5)^2 + R_4(Q_3 - Q_4)^2 + R_{00} \cdot \alpha(Q_3 - Q_4)^2 + \\
 + R_{10} \cdot (1 - x)Q_1 + R_5Q_1^2 - R_{03} \cdot \beta_{31}Q_3 + R_{23}Q_3^2 \\
 R_0(Q_2 + Q_4 - Q_1)^2 - R_1Q_1^2 - R_{04} \cdot \beta_{11}Q_1 - R_{21}Q_1^2 \\
 R_0(Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 + R_2(Q_2 + Q_1)^2 - R_3 \cdot \alpha Q_1^2 - \\
 - R_4(Q_3 + Q_4 - Q_5)^2 + R_5(Q_3 - Q_4)^2 + R_{00} \cdot \alpha(Q_3 - Q_4)^2 \\
 y^2 - l^2 - x^2 - 2lx \cos \alpha,
 \end{aligned} \right\} (5.5)$$

где $R_{10,01}$; $R_{20,02}$ — удельные аэродинамические сопротивления отрезка выработки [а, б] и соединяющей выработки, кгс $\text{с}^2/\text{м}^5$;

l — расстояние между точками и и а, м;

α — угол между линией и—а и выработкой на отрезке [а, б];

y — длина соединяющей выработки и—б, м.

Другие обозначения видны на рис. 5.2

При увеличении или уменьшении числа вентиляторов в объединенной вентиляционной системе увеличивается или уменьшается число уравнений в системах.

5.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ СОЕДИНЯЮЩЕЙ ВЫРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Методы линейного программирования позволяют определить место заложения соединяющей выработки при заданном распределении воздуха по выработкам объединенной вентиляционной

сети, в том числе по соединяющей выработке, при наличии разветвленных вентиляционных сетей объединенных шахт, т. е. без предварительного упрощения вентиляционных сетей.

Обозначим расход воздуха по соединяющей выработке Q_{i-} . Выделим отрезки на выработках, к которым может примыкать соединяющая выработка $[a, b]$ и $[d', b']$ и разобьем их на части с постоянным расходом воздуха. Длина i -го участка l_i одинакова для первой и второй вентиляционных систем. Пусть таких участков будет n .

Обозначим через x_i — расстояние от начальной точки i -го участка до возможного места примыкания соединяющей выработки и через x_{m+i} от конечной точки i -го участка.

Тогда функция цели в общем виде запишется

$$z = \sum_{i=1}^{n_1} R_{i-} (Q_{i-} + Q_{c_0})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} [x_i (Q_i + Q_{c_0})^2 + x_{m+i} Q_i^2] + \sum_{i=1}^{n_2} R_{i+} Q_{i+}^2 + \sum_{i=1}^{n_3} R_{i+} Q_{i+}^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} [x_i Q_i^2 + x_{m+i} (Q_i + Q_{c_0})^2] + \sum_{i=1}^{n_4} R_{i+} (Q_i + Q_{c_0})^2 + R_{c_0} Q_{c_0}^2 \rightarrow \min. \quad (5.6)$$

Система ограничений:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{i=1}^{n_1} R_{i-} (Q_{i-} + Q_{c_0})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} \alpha_i (Q_i + Q_{c_0})^2 + R_{c_0} Q_{c_0}^2 = \sum_{i=1}^{n_2} R_{i+} Q_{i+}^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} \alpha_i Q_i^2; \\ & \sum_{i=1}^{n_1} R_{i-} (Q_{i-} + Q_{c_0})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} [x_i (Q_i + Q_{c_0})^2 + x_{m+i} Q_i^2] + \sum_{i=1}^{n_2} R_{i+} Q_{i+}^2 < h_i; \\ & \sum_{i=1}^{n_3} R_{i+} Q_{i+}^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} [x_i Q_i^2 + x_{m+i} (Q_i + Q_{c_0})^2] + \sum_{i=1}^{n_4} R_{i+} (Q_i + Q_{c_0})^2 < h_i; \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

$$x_i + x_{m+i} = l_i; \quad x_i, x_{m+i} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где $R_{i,0}$; $R_{i,0}$; Q_i ; Q_i — удельные аэродинамические сопротивления i -х выработок, где возможно примыкание соединяющей выработки, и расход воздуха по ним для первой и второй объединяемых вентиляционных систем;

$R_{ni}; R'_{ni}; Q_{ni}; Q'_{ni}$ — аэродинамические сопротивления и расходы воздуха для i -й выработки, находящейся за отрезком возможного примыкания соединяющей выработки для первой и второй систем;

$R_{ni}; R'_{ni}; Q_{ni}; Q'_{ni}$ — то же, для выработок до отрезков примыкания;

$p_1; p_2$ — количество выработок за отрезком, где возможно заложение соединяющей выработки для первой и второй вентиляционных систем;

$q_1; q_2$ — то же, до конечной точки разветвлений;

$n_1; n_2$ — число выработок до отрезков примыкания для первой и второй вентиляционных систем;

R_{cs} — аэродинамическое сопротивление соединяющей выработки;

$h_1; h_2$ — депрессии струй максимальной величины до конечных разветвлений для первой и второй вентиляционных систем.

Первое ограничение в системе уравнений (5.7) указывает на равенство депрессий от начальных точек двух вентиляционных систем до точки их соединения (через соединяющую выработку).

Второе ограничение может включаться в систему, если соединяющая выработка примыкает к выработкам, не входящим в струю максимальной депрессии вентиляционной сети первой шахты. Оно дает возможность увеличить расход проходящего воздуха без увеличения депрессии первой вентиляционной сети. Если соединяющая выработка примыкает к выработкам, входящим в направлении максимальной депрессии вентиляционной сети первой шахты, то второе ограничение исключается.

Все вышесказанное о втором ограничении отнесется также к третьему ограничению системы (5.7), связанному с вентиляционной сетью второй объединяемой шахты.

Чем больше величина депрессии направления, к которому примыкает соединяющая выработка, отличается от депрессии максимального направления, тем более эффективным будет объединение шахт в одну вентиляционную систему. Если есть возможность выбрать не только точки примыкания соединяющей выработки, но также и выработку, к которой примыкает соединяющая выработка, среди ряда выработок, относящихся к разным направлениям, то наибольший эффект будет получен при примыкании к выработке направления с наименьшей депрессией.

Обычно ограничения по величине депрессии для разветвленной части сети целесообразно принимать для вентиляционной системы, в сторону которой движется воздух по соединяющей выработке. Для другой вентиляционной системы целесообразно

примыкать соединяющую выработку к выработкам направления с максимальной депрессией. Если это затруднительно или невозможно по топологии сети, то для увеличения расхода воздуха по направлению в первую очередь необходимо снять регуляторы на выработках направления, что приводит к уравнению депрессии выработок данного направления с перепадом давления направления максимальной депрессии.

5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ СОЕДИНЯЮЩЕЙ ВЫРАБОТКИ, РАСХОДА ВОЗДУХА ПО НЕЙ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Задача решается с применением метода множителей Лагранжа. В этом случае одновременно с местом заложения соединяющей выработки определяются расходы по соединяющей выработке $Q_{c.n}$ и производительность вентиляторов Q_1, Q_2 .

1. Длина соединяющей выработки постоянна.

Минимизируемая функция в общем виде запишется

$$z = a_{11} + a_{12}h_1 + a_{13}h_1^2 + a_{21} + a_{22}h_2 + a_{23}h_2^2, \quad (5.8)$$

где $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}$ — постоянные коэффициенты в уравнениях, описывающих кривые мощности вентиляторов соответственно первой и второй вентиляционных систем;

h_1, h_2 — депрессии вентиляторов указанных систем;

$$h_1 = \sum_{i=1}^{n_1} R_{ni} (Q_1 \pm \Delta Q_{ni} + Q_{c.n})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_i (Q_1 \pm \Delta Q_i + Q_{c.n})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_{m+i} (Q_1 \pm \Delta Q_i)^2 + \sum_{i=1}^{n_2} R_{ni} (Q_1 \pm \Delta Q_{ni})^2, \quad (5.9)$$

$$h_2 = \sum_{i=1}^{n_1} R_{ni} (Q_2 \pm \Delta Q_{ni} - Q_{c.n})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_i (Q_2 \pm \Delta Q_i - Q_{c.n})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_{m+i} (Q_2 \pm \Delta Q_i)^2 + \sum_{i=1}^{n_2} R_{ni} (Q_2 \pm \Delta Q_{ni})^2. \quad (5.10)$$

Уравнения связи:

$$b_{10} - b_{12}Q_1^2 = h_1; \quad (6.11)$$

$$b_{20} - b_{22}Q_2^2 = h_2; \quad (5.12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} R_{ni} (Q_1 \pm \Delta Q_{ni} + Q_{c.n})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_i (Q_1 \pm \Delta Q_i + Q_{c.n})^2 + R_{c.n} Q_{c.n}^2 = \sum_{i=1}^{n_1} R_{ni} (Q_2 \pm \Delta Q_{ni} - Q_{c.n})^2 + \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_i (Q_2 \pm \Delta Q_i - Q_{c.n})^2; \quad (6.13)$$

$$x_i + x_{m+i} = l_i, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5.14)$$

Введем вспомогательную функцию

$$\begin{aligned}
 F = & a_{11} + a_{12}h_1 + a_{13}h_1^2 + a_{14} + Q_{21}h_1 + a_{15}h_1^3 + \\
 & + \lambda_1(h_1 - b_{10} + b_{12}Q_1^2) + \lambda_2(h_2 - b_{21} + b_{22}Q_2^2) + \\
 & + \lambda_3 \left[\sum_{i=1}^m R_{0i} (Q_i \pm \Delta Q_{0i} + Q_{c,0})^2 + \sum_{i=1}^m R_{10} x_i \times \right. \\
 & \times (Q_i \pm \Delta Q_i + Q_{c,0})^2 + R_{c,0} Q_{c,0}^2 - \sum_{i=1}^m R_{0i} (Q_i \pm \\
 & \pm \Delta Q_{0i} - Q_{c,0})^2 - \sum_{i=1}^m R_{i,0} x_i (Q_i \pm \Delta Q_i - Q_{c,0})^2 \left. + \right. \\
 & + \lambda_{3,1}(x_1 + x_{m,1} - l_1) + \lambda_{3,2}(x_2 + x_{m,2} - l_2) + \\
 & + \dots + \lambda_{3,m}(x_m + x_{2m} - l_m).
 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Значения x_i ($i = 1, 2, \dots, 2m$), $Q_{c,0}$, Q_i ($i = 1, 2$), λ_k ($k = 1, 2, 3$) определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{dF}{dx_i} &= 0; \quad i = 1, 2, \dots, 2m; \\
 \frac{dF}{dQ_{c,0}} &= 0; \quad \frac{dF}{dQ_i} = 0; \quad i = 1, 2; \\
 \frac{dF}{dl_k} &= 0; \quad k = 1, 2, \dots, 3 + m.
 \end{aligned} \quad (5.16)$$

Система уравнений (5.16) решается методом линеаризации.

При решении задачи принимается, что воздух в объединяемых вентиляционных системах регулируется, расходы воздуха по выработкам всех направлений сетей (кроме одного) в каждой сети приняты постоянными.

В формулах (5.9), (5.10), (5.13), (5.15) ΔQ_{0i} , $\Delta Q_{i,0}$ — изменения расходов воздуха по выработкам основных направлений соответственно первой и второй вентиляционных систем за счет поступления (+) из i -й прилегающей выработки или отвлечения на i -ю выработку (-), на начальных участках сетей, где заложение соединяющей выработки невозможно; $\Delta Q_{i,0}$, ΔQ_{0i} — то же, для выработок на участках сетей, где возможно заложение соединяющей выработки; ΔQ_{0i} , $\Delta Q_{i,0}$ — то же, для выработок конечных участков сетей, где заложение соединяющей выработки невозможно.

6. РАСЧЕТ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ВЫРАБОТОК

6.1. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ПРОСТОМ ДИАГОНАЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ

Простое диагональное соединение (рис. 6.1) описывается системой уравнений второго порядка:

$$\left. \begin{aligned} R_1 Q_1^2 &= R_1 (Q_2 + Q_3)^2 + R_2 Q_2^2 \\ R_2 Q_2^2 &= R_2 (Q_1 + Q_3)^2 + R_1 Q_3^2 \end{aligned} \right\} (6.1)$$

где Q_1 , Q_2 , Q_3 — расходы воздуха по выработкам AC , BC , BD , $\text{м}^3/\text{с}$.

Система (6.1) имеет два уравнения и три неизвестных (Q_1 , Q_2 , Q_3), т. е. является неопределенной. Для перехода к определенной системе обычно правую и левую части уравнений системы (6.1) делят на Q_1^2 .

Обозначив $\frac{Q_2}{Q_1} = x$, $\frac{Q_3}{Q_1} = y$, запишем систему уравнений (6.1) в виде:

$$\left. \begin{aligned} R_1 x^2 &= R_1 (1 + y)^2 + R_2 \\ R_2 y^2 &= R_2 (1 + x)^2 + R_1 \end{aligned} \right\} (6.2)$$

От системы двух уравнений второго порядка (6.2) с помощью эквивалентных преобразований легко перейти к одному уравнению четвертого порядка. После преобразований и исключения x^2

$$x = \frac{1}{2} \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1}{R_2} \right) y^2 - \frac{R_2}{R_1} y - \frac{1}{2} \left(\frac{R_2 + R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} + 1 \right). (6.3)$$

Подставляя значение x в первое уравнение системы (6.2), получим уравнение четвертой степени относительно y , т. е.

$$b_4 y^4 + b_3 y^3 + b_2 y^2 + b_1 y + b_0 = 0, (6.4)$$

где

$$b_4 = \frac{R_1}{4} \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1}{R_2} \right)^2; \quad b_3 = -R_2 \left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1}{R_2} \right);$$

$$b_2 = \frac{R_4^3}{R_1} - \frac{R_1}{2} \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) \left(\frac{R_2}{R_3} - \frac{R_1}{R_1} \right) - R_4;$$

$$b_1 = R_1 \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) - 2R_4;$$

$$b_0 = \frac{R_1}{4} \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) - (R_1 + R_4).$$

Уравнение (6.4) может решаться с применением методов высшей алгебры. В пункте 6.6 (пример 1) приведено решение уравнения (6.4) с применением метода Феррари.

Более просто уравнение (6.4) решается приближенными методами, в частности методом Ньютона. Решим численный пример при следующих условиях: аэродинамические сопротивления выработок $R_1 = 0,08$, $R_2 = 0,035$, $R_3 = 0,105$, $R_4 = 0,06$, $R_5 = 0,057$ кгс·с²/м⁶, общий расход воздуха $Q = 30$ м³/с.

Уравнение (6.4) запишется в виде

$$2,38y^4 - 6,55y^3 - 13,74y^2 + 4,81y + 0,2 = 0 \quad (6.5)$$

Решим уравнение (6.5) методом Ньютона. Составим приближительную схему:

$$y \dots 0 \quad 1 \quad 10$$

$$\text{Знак } f(y) \dots + \quad - \quad +$$

Действительные положительные корни уравнения (6.5) находятся на отрезках 0,1 и 1,10. Так как значение корня на отрезке 0,1 дает отрицательное значение x по формуле (6.3), то уточняем значения корня на отрезке 1, 10.

При использовании метода Ньютона

$$y_{n+1} = y_n - \frac{f(y_n)}{f'(y_n)} \quad (6.6)$$

Расчеты по уточнению корней уравнения (6.5) сведем в табл. 6.1.

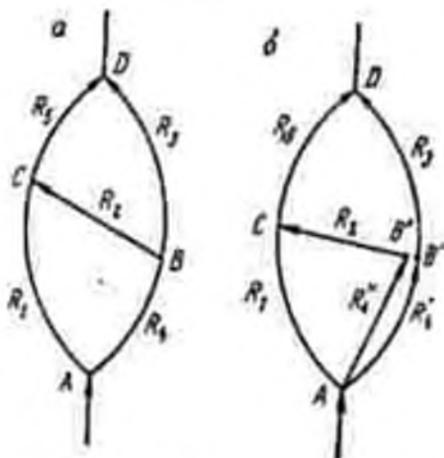


Рис. 6.1. Схема простого дросселированного течения

	v_n	$l(v_n)$	$l'(v_n)$	$\Delta v_n = -\frac{l(v_n)}{l'(v_n)}$
v_0	10	15 930,30	7 385,01	-2,16
v_1	7,84	5 034,68	3 169,15	-1,59
v_2	6,25	1 532,02	1 389,71	-1,10
v_3	5,16	440,08	642,48	-0,69
v_4	4,46	104,96	335,95	-0,31
v_5	4,15	27,32	232,78	-0,12
v_6	4,03	1,69	198,02	-0,0085
v_7	4,02			

По данным табл. 6.1 $y = 4,02$, тогда согласно (6.3) $x = 4,41$;

$$Q_0 = \frac{Q}{x+y+1} = 3,2 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_1 = Q_0 x = 14,0 \text{ м}^3/\text{с}, \quad Q_2 = Q_0 y =$$

$$= 12,8 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Решение задачи упрощается, если в систему уравнений (6.1) ввести общий расход воздуха.

Система уравнений может быть записана:

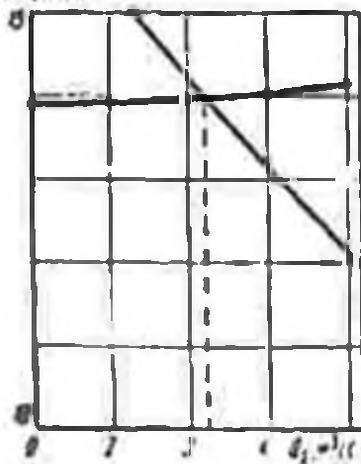
 $Q_2, \text{ м}^3/\text{с}$


Рис. 6.1. Графическое решение задачи по расходу воздуха в системе магистральных трубопроводов

$$\left. \begin{aligned} R_1 Q_1^2 - R_1 (Q - Q_1)^2 + R_2 Q_2^2; \\ R_2 (Q - Q_1 - Q_2)^2 - R_2 (Q_1 + \\ + Q_2)^2 + R_3 Q_3^2. \end{aligned} \right\} (6.7)$$

где Q_1 , Q_2 — расходы воздуха по выработкам AC и BC , $\text{м}^3/\text{с}$;

Q — общий расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$.

По выработкам AB , BD , CD проходят соответственно $(Q - Q_1)$, $(Q - Q_1 - Q_2)$, $(Q_1 + Q_2)$. В системе уравнений (6.7) неизвестными являются Q_1 , Q_2 .

Для нахождения корней системы уравнений (6.7) можно воспользоваться графическим методом. На

рис. 6.2 приведено графическое решение примера 1 (пункт 6.6). Как видно, для условий примера $Q_1 = 14 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_2 = 3,2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Систему уравнений (6.7) можно привести к одному уравнению четвертого порядка, аналогично приведению системы (6.1) к уравнению (6.4).

После эквивалентных преобразований системы (6.7) и решения полученного уравнения относительно Q_0 , получим

$$Q_0 = \frac{a_1 Q_1^2 - a_2 Q_1 + a_3}{a_4 Q_1 + a_5} \quad (6.8)$$

где

$$a_1 = (R_1 - R_2)(R_2 + R_3 - R_2) - R_2(R_1 - R_2);$$

$$a_2 = 2R_2(R_1 - R_2);$$

$$a_3 = 2Q[R_1(R_2 + R_3 - R_2) + R_2R_2];$$

$$a_4 = 2R_2R_2Q;$$

$$a_5 = |R_1(R_2 + R_3 - R_2) + R_2R_2|Q^2.$$

Подставив значение Q_2 в первое уравнение системы (6.7), получим

$$b_1Q_1^4 + b_2Q_1^3 + b_3Q_1^2 + b_4Q + b_5 = 0, \quad (6.9)$$

где

$$b_1 = R_2Q_2^4 + (R_1 - R_1)a_1^2; \quad b_2 = 2[(R_1 - R_1)a_1a_2 - R_2a_2a_1 - \\ - R_2a_2a_1 - R_1a_2^2Q];$$

$$b_3 = R_2a_2^2 + 2R_2a_2a_1 + (R_1 - R_1)a_1^2 - 4R_1a_1a_2Q + R_1a_2^2Q^2;$$

$$b_4 = 2(R_1a_1a_2Q^2 - R_2a_2a_2 - R_1a_1^2Q);$$

$$b_5 = R_2a_2^2 + R_1a_1^2Q^2.$$

Уравнение (6.9) можно решить методом Ньютона. После определения значения Q_1 из уравнения (6.9) количество воздуха Q_2 находится по формуле (6.8).

В пункте 6.6 (пример 2) приведено решение численного примера с непосредственным определением Q_1 и Q_2 .

6.2 РАСЧЕТ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДИАГОНАЛЬНЫХ И РЯДА КОМБИНИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ «РАСЩЕПЛЕНИЯ» ВЫРАБОТОК

Метод расчета путем «расщепления» выработок был предложен М. М. Протодяконовым на частном примере. Ниже предлагается методика расчета диагональных и ряда других комбинированных соединений методом «расщепления» выработок.

«Расщепление» выработок с исключением диагонально расположенных выработок можно производить при расчете вентиляционных систем путем предварительного упрощения эквивалентными преобразованиями.

При преобразовании соединений одна или несколько выработок с сопротивлением R_l заменяются двумя выработками с сопротивлениями R_l^i и R_l^j , которые при l -м приближении определяются по формулам:

$$R_{ll}^i = R_l \left(1 + \frac{Q_{ll}^i}{Q_{ll}}\right)^2; \quad R_{ll}^j = R_l \left(1 + \frac{Q_{ll}^j}{Q_{ll}}\right)^2, \quad (6.10)$$

где Q_{ll}^i и Q_{ll}^j — расходы воздуха по выработкам с сопротивлениями R_l^i и R_l^j .

Простое диагональное соединение на рис. 6.1, а может быть преобразовано к виду на рис. 6.1, б. Выработка АВ (с сопротивлением R_1) заменяется выработками с сопротивлениями R'_1 и R''_1 , которые при i -м приближении определяются по формулам (6.10).

В качестве первого приближения принимается $Q_{11} = Q''_{11}$, тогда $R'_{11} = R''_{11} = 4R_1$. Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$Q_{1i} = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1} + R_2}{R_2 + R_{н.лс. i-1}}}}; \quad Q'_{1i} = \frac{Q - Q'_{1i}}{1 + \sqrt{\frac{R_2 + R'_{1, i-1}}{R_1}}}, \quad (6.11)$$

где Q — общий расход воздуха в соединении, м³/с;
 $R_{н.лс.}$ — аэродинамическое сопротивление параллельного соединения АС. Другие обозначения соответствуют приведенным на рис. 6.1.

Определение R'_i и R''_i производится путем многократных повторений расчетов по формулам (6.10), (6.11).

При двух диагоналях с движением воздуха в одном направлении (рис. 6.3, а) соединение преобразуется до вида на рис. 6.3, б. В этом случае выработки АВ и ЕФ (с сопротивлениями R_1 и R_2) заменяются «расцепленными» выработками АВ', АВ'' и Е'Ф, Е''Ф (с сопротивлениями R'_1, R''_1 и R'_2, R''_2), которые при i -м приближении определяются по формулам (6.10). В качестве первого приближения принимаются $Q'_{11} = Q''_{11}$ и $Q'_{21} = Q''_{21}$, тогда $R'_{11} = R''_{11} = 4R_1$, $R'_{21} = R''_{21} = 4R_2$. Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$Q'_{1i} = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1} + R_2 + R_{н.дф. i-1}}{R_{н.лс. i-1} + R_2 + R'_{2, i-1}}}}; \quad Q'_{2i} = Q - Q'_{1i};$$

$$Q'_{2i} = \frac{Q'_{2i}}{1 + \sqrt{\frac{R_{2, i-1} + R_1}{R_1}}}; \quad Q''_{2i} = \frac{Q'_{2i}}{1 + \sqrt{\frac{R_1 + R'_{2, i-1}}{R_2}}}, \quad (6.12)$$

где $R_{н.лс.}$; $R_{н.дф.}$ — аэродинамические сопротивления параллельных соединений АВ'С, ДЕ'Ф (рис. 6.3, б).

При движении воздуха по диагоналям в противоположном направлении (рис. 6.3, а) соединение преобразуется до вида, приведенного на рис. 6.3, г. В этом случае выработки АВ и ДФ с сопротивлениями R_1 и R_2 заменяются выработками АВ', АВ'' и Д'Ф, Д''Ф с сопротивлениями R'_1, R''_1 и R'_2, R''_2 , которые при i -м приближении определяются по формулам (6.10). В качестве первого приближения принимаются $Q'_{11} = Q''_{11}$ и $Q'_{21} = Q''_{21}$, тогда

$R_{d1} = R_{d1} = 4R_d$. $R_{z1} = R_{z1} = 4R_z$. Расходы воздуха при 1-м приближении определяются по формулам:

$$Q_{d1} = Q_{z1} = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{d, i+1} + R_7 + R_{z, i-1}}{R_{D AC, i-1} + R_2 + R_{D EF, i-1}}}};$$

$$Q_{CE1} = Q - Q_{d1};$$

$$Q_{d1} = \frac{Q_{CE1}}{1 + \sqrt{\frac{R_{d, i-1} + R_1}{R_2}}}; \quad Q_{z1} = \frac{Q_{CE1}}{1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{z, i-1}}{R_2}}}. \quad (6.13)$$

где $R_{D EF}$ — аэродинамическое сопротивление параллельного соединения D^*EF (рис. 6.3, з).

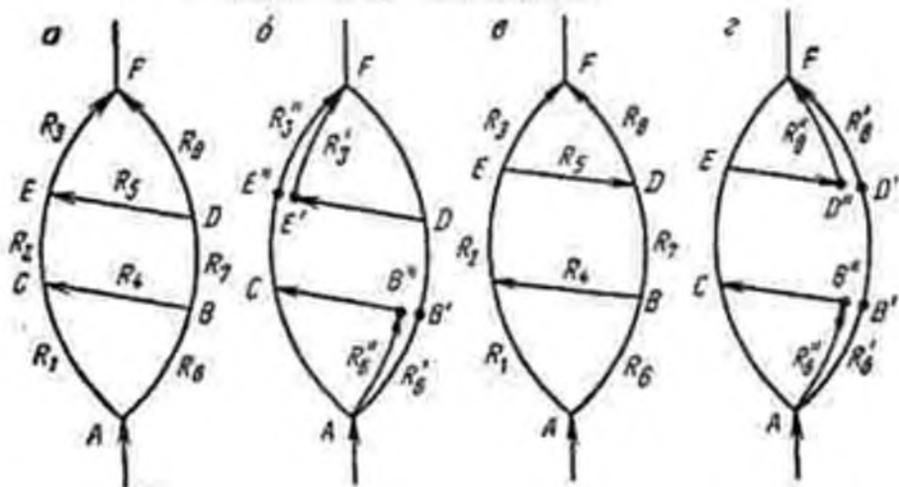


Рис. 6.3. Схемы преобразования соединений с двумя диагоналями

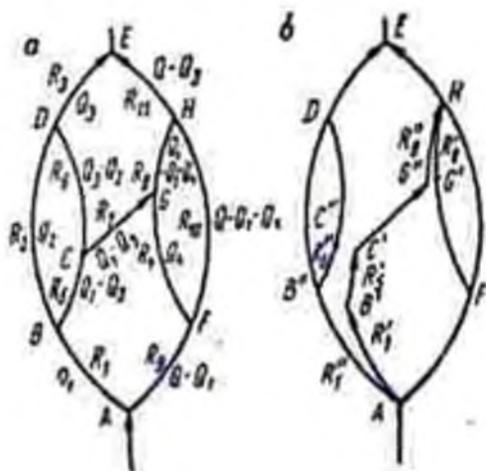


Рис. 6.4. Схемы преобразования комбинированного соединения выработки с диагональю

Методом расщепления выработок можно рассчитать и упростить комбинированное соединение с диагональю, решение которого затруднено невозможностью выделения диагонали в локальное диагональное соединение (рис. 6.4, а).

Для определения направления движения воздуха по выра-
ботке CG схема описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_7 Q_2^2 - R_8 (Q_1 - Q_2)^2 - R_9 (Q_2 - Q_3)^2 &= 0; \\ R_1 Q_1^2 + R_8 (Q_1 - Q_2)^2 + \frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_7 (Q_1 - Q_2)^2 + \\ &+ R_9 (Q_1 - Q_2)^2 - R_4 Q_2^2 = 0; \\ R_9 (Q_2 - Q_3)^2 + R_5 Q_3^2 - \frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_7 (Q_1 - Q_2)^2 + \\ &+ R_8 (Q_1 - Q_2 + Q_3)^2 - R_{11} (Q - Q_2)^2 = 0; \\ R_4 Q_1^2 + R_8 (Q_1 - Q_2 + Q_3)^2 - R_{10} (Q - Q_1 - Q_3)^2 &= 0. \end{aligned} \right\} (6.14)$$

Система уравнений (6.14) решается методом линеаризации. Решение этой системы дает распределение воздуха в сети на рис. 6.4, а. При необходимости преобразования соединения с исключением диагонали для определения направления движения воздуха на выработке CG производится несколько итераций до получения устойчивого знака дроби $\frac{c_1 - c_2}{|c_1 - c_2|}$.

Соединение на рис. 6.4, а преобразуется до вида, изображенного на рис. 6.4, б. В данном случае выработки AB , BC , CH с сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 заменяются выработками с сопротивлениями R_1 и R_1' , R_2 и R_2' , R_3 и R_3' , которые определяются по формулам (6.10). Обозначим $Q_1 - Q_2 = Q_2$; $Q_1 - Q_2 - Q_3 = Q_3$.

В качестве первого приближения принимаем: $Q_{11} = Q_{11}'$; $Q_{11} = Q_{11}$; $Q_1 = Q_1$, тогда $R_{11} = R_{11}' = 4R$; $R_2 = R_{21}' = 4R_2$; $R_3 = R_{31}' = 4R_3$. Расходы воздуха при l -м приближении определяются по формулам:

$$\begin{aligned} Q_{11}^* &= \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, l-1}' + R_{2, l-1}' + R_3}{R_{1, l-1} + R_{11}}}}; \\ Q_{21}^* &= \frac{Q_{11}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_{2, l-1}' + R_2}{R_2}}}; \\ Q_{31}^* = Q_{21}^* = Q_{11}^* &= \frac{Q - Q_{11}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, l-1}' + R_{2, l-1}' + R_2 + R_{3, l-1}'}{R_2 + R_{11}}}}; \\ Q_{11}' &= \frac{Q - Q_{11}^* - Q_{31}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_{3, l-1}'}{R_{11}}}}. \end{aligned} \quad (6.15)$$

где $R_{\text{ВД}}$, $R_{\text{АН}}$, $R_{\text{ВН}}$ — аэродинамические сопротивления параллельных соединений ВД, АН, ВН.

Рассмотренные преобразования соединений не изменяют их общего аэродинамического сопротивления. Не изменяются при преобразованиях также расходы воздуха по выработкам, которые не «расщепляются». Расход воздуха по «расщепляющейся» выра-

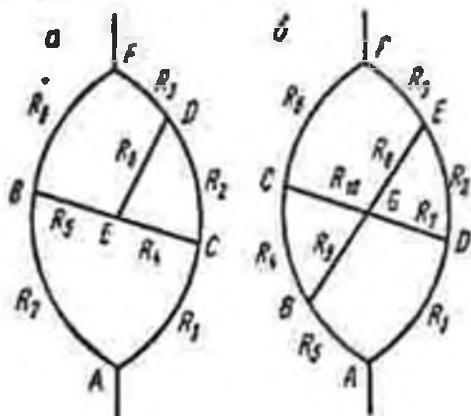
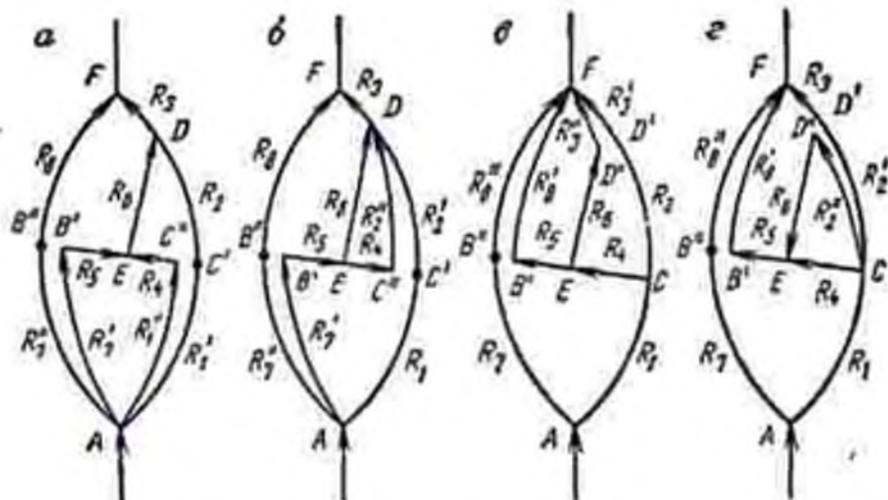


Рис. 6.5. Сеть линейных соединений воздушной выработки

Рис. 6.6. Сеть преобразованной сети соединений, приведенного на рис. 6.5, а



ботке равен сумме расходов, определенных для двух «расщепленных» выработок.

Путем «расщепления» выработок можно преобразовать и рассчитать комбинированные соединения, приведенные на рис. 6.5.

Рассмотрим соединение на рис. 6.5, а, которое в зависимости от направления движения воздуха по выработкам преобразуется к различным видам, приведенным на рис. 6.6.

Направление движения воздуха по внутренним выработкам соединения определяется с помощью метода, изложенного в пункте 6.5, или с помощью метода линейных цепей [84].

При движении воздуха (рис. 6.6, а) от точки В к Е, от точки С к Е, от Е к D выработки АС с сопротивлением R_1 и АВ с сопротивлением R_2 заменяются выработками АС', АС" с сопротивлениями R_1' , R_1'' и выработками АВ', АВ" с сопротивлениями R_2' , R_2'' . Эти сопротивления при i -м приближении определяются по формулам (6.10). В качестве первого приближения принимаем $Q_{1i} = Q_{2i}$, тогда $R_{1i}' = R_{1i}'' = 4R_1$; $R_{2i}' = R_{2i}'' = 4R_2$.

Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам

$$Q_{1i}' = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}' + R_2}{R_{\text{п. АВ}, i-1} + R_3}}}; \quad Q_{1i}'' = \frac{Q - Q_{2i}}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}'' + R_2}{R_{\text{п. АЕ}, i-1} + R_3}}};$$

$$Q_{2i}' = \frac{Q - Q_{1i}' - Q_{1i}''}{1 + \sqrt{\frac{R_{2, i-1}' + R_3}{R_{1, i-1}' + R_4}}};$$

$$Q_{2i}'' = Q - Q_{1i}' - Q_{1i}'' - Q_{2i}'. \quad (6.15)$$

$R_{\text{п. АЕ}}$, $R_{\text{п. АВ}}$ — аэродинамические сопротивления параллельных соединений выработок АЕД и АВС' (рис. 6.6, а):

$$R_{\text{п. АЕ}, i-1} = \frac{R_{1, i-1}' + R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}' + R_2}{R_{\text{п. АЕ}, i-1} + R_3}}\right)^2};$$

$$R_{\text{п. АВ}, i-1} = \frac{R_{2, i-1}' + R_3}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{2, i-1}' + R_3}{R_{1, i-1}' + R_4}}\right)^2}. \quad (6.17)$$

При движении воздуха (рис. 6.6, б) от В к Е, от Е к С, от Е к D выработки АВ и СД (с сопротивлениями R_2 и R_3) заменяются выработками АВ', АВ" (с сопротивлениями R_2' , R_2'' и выработками СД', СД" с сопротивлениями R_3' , R_3''). Эти сопротивления при i -м приближении определяются по формулам (6.10). В качестве первого приближения принимается $Q_{1i}' = Q_{1i}''$ и $Q_{2i}' = Q_{2i}''$, тогда $R_{1i}' = R_{1i}'' = 4R_1$; $R_{2i}' = R_{2i}'' = 4R_2$; $R_{3i}' = R_{3i}'' = 4R_3$.

Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$Q_{1i}^* = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}^* + R_4}{R_{nAD, i-1} + R_3}}};$$

$$Q_{2i}^* = \frac{Q - Q_{1i}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_{2, i-1}^*}{R_{7, i-1}^* + R_5 + R_{nED, i-1}}}};$$

$$Q_{3i}^* = Q - Q_{1i}^* - Q_{2i}^*; \quad Q_{3i}^* = \frac{Q_{2i}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_4 + R_{2, i-1}^*}{R_6}}}. \quad (6.18)$$

где R_{nAD} , R_{nED} — гидравлические сопротивления параллельных соединений выработок $AB'ED$, $EC'D$ (рис. 6.6. θ),

$$R_{nAD, i-1} = \frac{R_1 + R_{2, i-1}^*}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_{2, i-1}^*}{R_{7, i-1}^* + R_5 + R_{nED, i-1}}}\right)^2};$$

$$R_{nED, i-1} = \frac{R_6}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_6}{R_4 + R_{2, i-1}^*}}\right)^2}. \quad (6.19)$$

При движении воздуха (рис. 6.6. θ) от C к E , от E к B , от E к D выработки BF и DF (с сопротивлениями R_4 и R_3) заменяются выработками $B'F$ и $B''F$ (с сопротивлениями R_4^* , R_3^*) и выработками $D'F$ и $D''F$ с сопротивлениями R_3^* и R_4^* . Эти сопротивления при i -м приближении определяются по формулам (6.10). В качестве первого приближения принимаем $Q_{1i} = Q_{1i}^*$ и $Q_{2i} = Q_{2i}^*$, тогда $R_{4i}^* = R_{4i}^* = 4R_4$; $R_{3i}^* = R_{3i}^* = 4R_3$.

Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$Q_{1i}^* = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{8, i-1}^*}{R_1 + R_{nCF, i-1}}}};$$

$$Q_{2i}^* = \frac{Q - Q_{1i}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{3, i-1}^*}{R_4 + R_{nEF, i-1}}}};$$

$$Q_{ii} = \frac{Q - Q_{ii}^* - Q_{ii}}{1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{2, i-1}^*}{R_1 + R_{1, i-1}^*}}}$$

$$Q_{ii}^* = Q - Q_{ii} - Q_{ii} - Q_{ii} \quad (6.20)$$

где $R_{1, i-1}$, $R_{2, i-1}$ — аэродинамические сопротивления параллельных соединений выработок CEF и $EBFD^*$ (рис. 6 б, в).

$$R_{1, i-1} = \frac{R_1 + R_{1, i-1}^*}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{2, i-1}^*}{R_1 + R_{1, i-1}^*}}\right)^2}$$

$$R_{2, i-1} = \frac{R_2 + R_{2, i-1}^*}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{2, i-1}^*}{R_1 + R_{1, i-1}^*}}\right)^2} \quad (6.21)$$

При движении воздуха (рис. 6 б, в) от C к E , от E к B , от D к E выработки BF и CD (с сопротивлениями R_1 и R_2) заменяются выработками B^*F , B^*F (с сопротивлениями R_1^* , R_1^* и выработками D^* , CD^* с сопротивлениями R_2^* , R_2^*). Эти сопротивления при i -м приближении определяются по формулам (6.10). В качестве первого приближения принимаются $Q_{ii} = Q_{ii}$; $Q_{ii}^* = Q_{ii}$, тогда $R_{1i} = R_{1i} = 4R_1$; $R_{2i} = R_{2i} = 4R_2$.

Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$Q_{ii} = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{2, i-1}^*}{R_1 + R_{1, i-1}^*}}}$$

$$Q_{ii}^* = \frac{Q - Q_{ii}}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1} + R_1 + R_{1, i-1}^*}{R_{2, i-1} + R_2}}}$$

$$Q_{ii} = Q - Q_{ii} - Q_{ii}^*$$

$$Q_{ii}^* = \frac{Q_{ii}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_{2, i-1} + R_2}{R_1}}} \quad (6.22)$$

где $R_{н.ср.}$, $R_{н.св.}$ — аэродинамические сопротивления параллельных соединений выработок $CEB'F$ и CED' (рис. 6.6, ϵ).

$$R_{н.ср. i-1} = \frac{R_{2, i-1} + R_3}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{2, i-1} + R_3}{R_{н.св. i-1} + R_3 + R_{2, i-1}}}\right)^2}$$

$$R_{н.св. i-1} = \frac{R_4}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_4}{R_{2, i-1} + R_4}}\right)^2} \quad (6.23)$$

Рассмотрим соединение на рис. 6.5, б. Это соединение в зависимости от направления движения воздуха по выработкам преобразуется к различным видам, приведенным на рис. 6.7. Направление движения воздуха по внутренним выработкам соединения

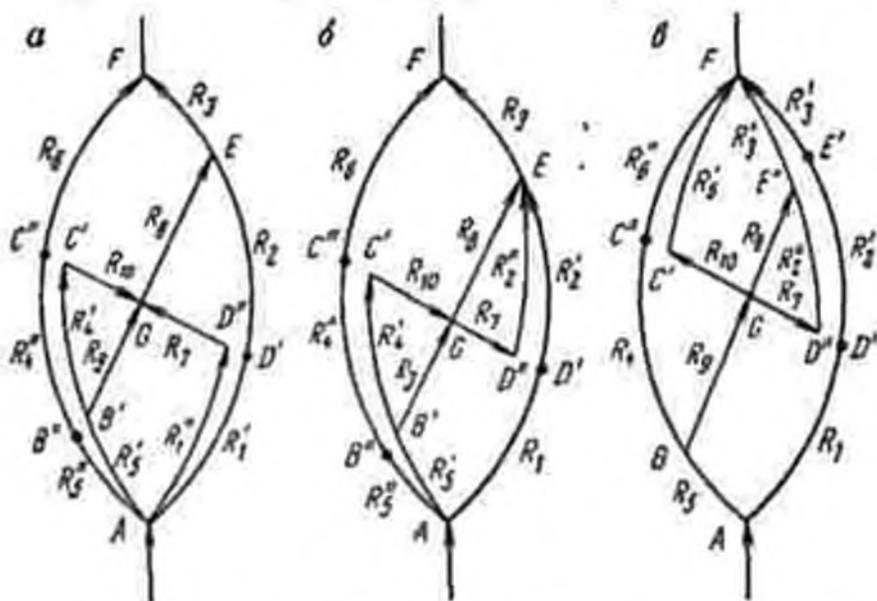


Рис. 6.7. Схемы преобразованной сети при различных направлениях движения воздуха, приведенного на рис. 6.2, б

определяется, как и для соединения на рис. 6.5, а. При движении воздуха (рис. 6.7, а) от точки А к G, от С к G, от D к G, от G к E выработки АВ, ВС, AD (с сопротивлениями R_2 , R_3 , R_1) заменяются выработками АВ', АВ'' (с сопротивлениями R_4 , R_5), В'С', В''С'' (с сопротивлениями R_6 , R_7), и выработками AD', AD'' с сопротивлениями R_8 , R_9 . Эти сопротивления при i -м приближении определяются по формулам (6.10).

В качестве первого приближения принимаем $Q_{11} = Q_{11}$, $Q_{11} = -D_{11}$, $Q_{11} = Q_{11}$, тогда $R_{11} = R_{11} = 4R_3$; $R_{11} = R_{11} = 4R_4$; $R_{11} = R_{11} = 4R_5$.

Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 Q_{ii}^* = Q_{ii}^- &= \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{5, i-1}^* + R_{4, i-1}^* + R_6}{R_{\sigma \Delta E, i-1} + R_3}}}; \\
 Q_{ii}^* &= \frac{Q - Q_{ii}^-}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}^* + R_2}{R_{\sigma \Delta \sigma, i-1} + R_8}}}; \\
 Q_{ii}^* &= \frac{Q - Q_{ii}^- - Q_{ii}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}^* + R_7}{R_{\delta i-1} + R_{\pi \delta \sigma, i-1}}}}; \\
 Q_{ii}^* &= Q - Q_{ii}^- - Q_{ii}^* - Q_{ii}^*; \\
 Q_{ii}^* &= \frac{Q_{ii}^-}{1 + \sqrt{\frac{R_{4, i-1}^* + R_{10}}{R_9}}}, \quad (6.24)
 \end{aligned}$$

где $R_{\sigma \Delta E}$, $R_{\sigma \Delta \sigma}$, $R_{\pi \delta \sigma}$ — аэродинамические сопротивления параллельных соединений выработок AGE , $AC'GD'$, $B'C'GD'$ (рис. 6.7, а).

$$\begin{aligned}
 R_{\sigma \Delta E, i-1} &= \frac{R_{1, i-1}^* + R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}^* + R_2}{R_{\sigma \Delta \sigma, i-1} + R_6}}\right)^2}; \\
 R_{\sigma \Delta \sigma, i-1} &= \frac{R_{1, i-1}^* + R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1}^* + R_2}{R_{\delta, i-1} + R_{\pi \delta \sigma, i-1}}}\right)^2}; \\
 R_{\pi \delta \sigma, i-1} &= \frac{R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_{4, i-1}^* + R_{10}}}\right)^2}. \quad (6.25)
 \end{aligned}$$

При движении воздуха (рис. 6.7, б) от B к G , от C к G ; от G к E ; от G к D выработки AB ; BC ; DE (с сопротивлениями R_2 , R_4 , R_1) заменяются выработками AB' , AB'' (с сопротивлениями R_{1i} , R_i), $B'C'$, $B''C''$ (с сопротивлениями R_{2i} , R_i) и $D'E$, $D''E$ (с сопротивлениями R_{3i} , R_{3i}) Эти сопротивления при i -м приближении определяются по формулам 6.10). В качестве первого приближения принимается $Q_{ii}^- = Q_{ii}^-$; $Q_{ii}^- = Q_{ii}^-$; $Q_{ii}^- = Q_{ii}^-$, тогда $R_{\delta i-1} = R_{1i} = 4R_2$; $R_{\sigma i-1} = R_{2i} = 4R_4$; $R_{\pi i-1} = R_{3i} = 4R_1$.

Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 Q_{1i} &= Q_{ii} \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{2, i-1} + R_{1, i-1} + R_6}{R_{0AE, i-1} + R_3}}}; \\
 Q_{2i} &= \frac{Q - Q_{1i}}{1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_{2, i-1}}{R_{1, i-1} + R_{0B'G, i-1} + R_{0CE, i-1}}}}; \\
 Q_{3i} &= Q - Q_{1i} - Q_{2i}; \\
 Q_{4i} &= \frac{Q_{3i}}{1 + \sqrt{\frac{R_{1, i-1} + R_{10}}{R_9}}}; \\
 Q_{5i} &= \frac{Q_{3i}}{1 + \sqrt{\frac{R_9}{R_7 + R_{2, i-1}}}}. \tag{6.26}
 \end{aligned}$$

где R_{0AE} , $R_{0B'G}$, R_{0CE} — аэродинамические сопротивления параллельных соединений выработок $AB'GE$, $B'C'G$, $GD'E$ (рис. 6.7, б),

$$\begin{aligned}
 R_{0AE, i-1} &= \frac{R_1 + R_{2, i-1}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_{2, i-1}}{R_{1, i-1} + R_{0B'G, i-1} + R_{0CE, i-1}}}\right)^2}; \\
 R_{0B'G, i-1} &= \frac{R_9}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_9}{R_{1, i-1} + R_{10}}}\right)^2}; \\
 R_{0CE, i-1} &= \frac{R_9}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_9}{R_7 + R_{2, i-1}}}\right)^2}. \tag{6.27}
 \end{aligned}$$

При движении воздуха (рис. 6.7, а) от B к G , от G к C , от C к D ; от C к E выработки CF , DE , EF (с сопротивлениями R_6 , R_2 , R_3) заменяются выработками $G'F$, $C'F$ (с сопротивлениями R_4 , R_5), $D'E$, $D'E'$ (с сопротивлениями R_7 , R_8), $E'F$, $E'F'$ (с сопротивлениями R_9 , R_9). Эти сопротивления при i -м приближении определяются по формуле (6.10). В качестве первого приближения принимаются $Q_{41} = Q_{51}$, $Q_{21} = Q_{31}$, $Q_{31} = Q_{11}$, тогда $R_{41} = R_{51} = 4R_6$; $R_{21} = R_{31} = 4R_2$; $R_{31} = R_{11} = 4R_3$.

Расходы воздуха при i -м приближении определяются по формулам:

$$Q_{21}^i = Q_{21}^* - \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_{2, i-1}^* + R_{3, i-1}^*}{R_5 + R_{\text{н в ф. } i-1}}}};$$

$$Q_{41}^i = \frac{Q - Q_{21}^i}{1 + \sqrt{\frac{R_4 + R_{6, i-1}^*}{R_8 + R_{\text{н о ф. } i-1}}}};$$

$$Q_{61}^i = \frac{Q - (Q_{21}^i + Q_{41}^i)}{1 + \sqrt{\frac{R_{\text{н о е. } i-1}^* + R_{3, i-1}^*}{R_{10} + R_{8, i-1}^*}}};$$

$$Q_{21}^* = \frac{Q_{21}^*}{1 + \sqrt{\frac{R_7 + R_{2, i-1}^*}{R_9}}}, \quad (6.28)$$

где $R_{\text{н в ф}}$; $R_{\text{н о ф}}$; $R_{\text{н о е}}$ — аэродинамические сопротивления параллельных соединений выработок BGF, GE^oFC; GD^oE (рис. 6.7, в).

$$R_{\text{н в ф. } i-1} = \frac{R_4 + R_{6, i-1}^*}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_4 + R_{6, i-1}^*}{R_8 + R_{\text{н о ф. } i-1}}}\right)^2};$$

$$R_{\text{н о ф. } i-1} = \frac{R_{10} + R_{8, i-1}^*}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{10} + R_{8, i-1}^*}{R_{\text{н о е. } i-1}^* + R_{3, i-1}^*}}\right)^2};$$

$$R_{\text{н о е. } i-1} = \frac{R_6}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_6}{R_7 + R_{2, i-1}^*}}\right)^2}. \quad (6.29)$$

6.3 РАСЧЕТ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДИАГОНАЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ МНОГОКРАТНЫХ «РАСЩЕПЛЕНИЙ» ВЫРАБОТОК

Методом многократных «расщеплений» выработок можно преобразовать и рассчитать диагональное соединение с любым числом диагоналей, если воздух по всем диагоналям движется в одном направлении или в двух направлениях при условии, что движение в противоположных направлениях имеет место только в двух смежных диагоналях.

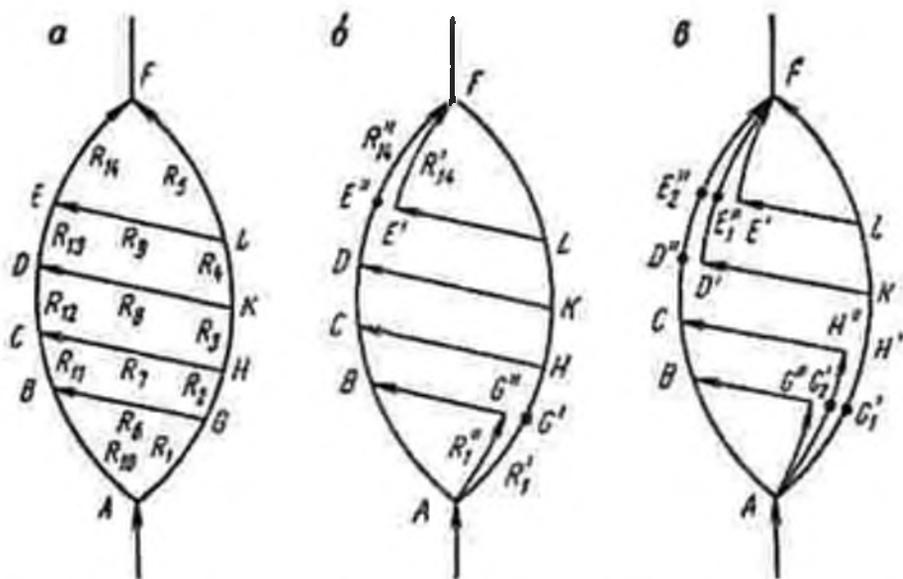


Рис. 6.8. Схемы преобразования сложного диагонального соединения при движении воздуха в одном направлении

Рассмотрим диагональное соединение с четырьмя диагоналями при движении воздуха по всем диагоналям в одном направлении (рис. 6.8, а). Предлагаемый порядок расчета остается таким же при любом числе диагоналей. Обычно преобразование диагонального соединения производится в несколько этапов. При наличии в соединении четырех диагоналей это преобразование производится в два этапа. На первом этапе заменяются две выработки, прилегающие к начальной и конечной точкам соединения. Выработки AG и EF (с сопротивлениями R_1, R_{14}) заменяются выработками AG' , AG'' (с сопротивлениями R'_1, R''_1) и $E'F$, $E''F$ (с сопротивлениями R'_{14}, R''_{14}). Значения $R'_{14}, R''_{14}, R'_{11}, R''_{11}$ определяются по формулам (6.10). На втором этапе заменяются выработки $AG'H$ (с сопротивлением $R'_1 + R_2$) и $DE''F$ (с сопротивлением $R_{12} + R''_{11}$) эквивалентными выработками AG'_1H' , AG''_1H'' (с сопротивлениями $R_{AG'_1}$ и $R_{AG''_1}$) и $D'E'_1F$, $D''E''_1F$ (с сопротивлениями $R_{D'E'_1}$ и $R_{D''E''_1}$).

При i -м приближении.

$$R_{AH^{i-1}} = (R_{1i} + R_2) \left(1 + \frac{Q_{AH^{i-1}}}{Q_{AH^{i-1}}} \right)^2; \quad (6.30)$$

$$R_{AH^i} = (R_{1i} + R_2) \left(1 + \frac{Q_{AH^i}}{Q_{AH^i}} \right)^2; \quad (6.31)$$

$$R_{D^i P_i} = (R_{11i} + R_{12}) \left(1 - \frac{Q_{D^i P_i}}{Q_{D^i P_i}} \right)^2; \quad (6.32)$$

$$R_{D^i P_i} = (R_{11i} + R_{12}) \left(1 + \frac{Q_{D^i P_i}}{Q_{D^i P_i}} \right)^2; \quad (6.33)$$

$$Q_{1i} = Q_{AH^i} + Q_{AH^{i-1}}; \quad (6.34)$$

$$Q_{11i} = Q_{D^i P_i} + Q_{D^i P_i}; \quad (6.35)$$

В качестве первого приближения принимается $Q_{1i} = Q_{1i}$.
 $Q_{AH^i} = Q_{AH^i}$; $Q_{11i} = Q_{11i}$; $Q_{D^i P_i} = Q_{D^i P_i}$.
 Тогда

$$R_{1i} = R_{1i} = 4R_1; \quad R_{11i} = R_{11i} = 4R_{11}; \quad R_{AH^{i-1}} = R_{AH^{i-1}} = \\ = 4(4R_1 + R_2); \quad R_{D^i P_i} = R_{D^i P_i} = 4(4R_{11} + R_{12}).$$

Расход воздуха при $i+1$ приближении определяются

$$Q_{AH^{i+1}} = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{AH^i} + R_2 + R_{11} K_{D^i P_i}}{R_{D^i P_i} + R_{12} + R_{11} A_{H^i C_i}}}}; \quad (6.36)$$

или

$$R_{11} K_{D^i P_i} = \frac{R_2 + R_{D^i P_i}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{D^i P_i}}{R_2 + \frac{R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_2 + R_{11i}^*}} \right)^2}}}} \right)^2}; \quad (6.37)$$

$$R_{11} A_{H^i C_i} = \frac{R_7 + R_{AH^i}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_7 + R_{AH^i}}{R_{11} + \frac{R_{11}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{11}}{R_2 + R_{11i}^*}} \right)^2}}}} \right)^2}; \quad (6.38)$$

$$Q_{D^i P_i, i+1} = Q - Q_{AH^{i+1}}; \quad (6.39)$$

$$Q_{AH^*, i+1} = \frac{Q_{D^*F, i+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_7 + R_{AH^*i}}{R_{11} + \frac{R_{12}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{12}}{R_8 + R_{11}^*}}\right)^2}}}}; \quad (6.40)$$

$$Q_{i, i+1} = Q_{AH^*, i+1} + Q_{AH^*, i+1}; \quad (6.41)$$

$$Q_{BC, i+1} = Q_{D^*F, i+1} - Q_{AH^*, i+1}; \quad (6.42)$$

$$Q_{i, i+1} = \frac{Q_{BC, i+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_8 + R_{11}^*}{R_{12}}}}; \quad (6.43)$$

$$Q_{D^*F, i+1} = \frac{Q_{AH^*, i+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_8 + R_{D^*F}}{R_1 + \frac{R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_9 + R_{11}^*}}\right)^2}}}}; \quad (6.44)$$

$$Q_{ii, i+1} = Q_{D^*F, i+1} + Q_{D^*F, i+1}; \quad (6.45)$$

$$Q_{KL, i+1} = Q_{AH^*, i+1} - Q_{D^*F, i+1}; \quad (6.46)$$

$$Q_{ii, i+1} = \frac{Q_{KL, i+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_9 + R_{11}^*}{R_2}}}. \quad (6.47)$$

Рассмотрим случай, когда воздух по диагоналям движется в двух направлениях, причем движение в противоположных направлениях имеет место только в двух смежных диагоналях. Пусть по верхним диагоналям воздух движется в одном направлении, а по нижним диагоналям — в другом.

Как и в первом случае, преобразование соединения должно производиться в несколько этапов. Для соединения на рис. 6.9, а преобразование производится в два этапа. На первом этапе заменяются выработки AG (сопротивлением R_1) и LF (сопротивлением R_1) выработками AG^* и AG^* (сопротивлениями R_1^* и R_1^*) и L^*F и L^*F (с сопротивлениями R_1^* и R_1^*). Значения R_{11} , R_{11}^* , R_{12} , R_8 определяются по формулам (6.10).

На втором этапе производится такая же замена, как и в первом случае выработки AG^*H . Выработка KL^*F (с сопротивлением $R_1 + R_1$) заменяется эквивалентными выработками K^*L^*F , K^*L^*F (с сопротивлениями R_{K^*F} , R_{K^*F}).

При i -м приближении сопротивления эквивалентных выработок определяются по формулам (6.30) и (6.31), а также по формулам

$$R_{K \cdot P, i} = (R_s + R_i) \left(1 + \frac{Q_{K \cdot P, i}}{Q_{K \cdot P, i}} \right)^2; \quad (6.48)$$

$$R_{K \cdot P, i} = (R_s + R_i) \left(1 + \frac{Q_{K \cdot P, i}}{Q_{K \cdot P, i}} \right)^2. \quad (6.49)$$

Имеет место соотношение (6.34), а также

$$Q_M = Q_{K \cdot P, i} + Q_{K \cdot P, i}. \quad (6.50)$$

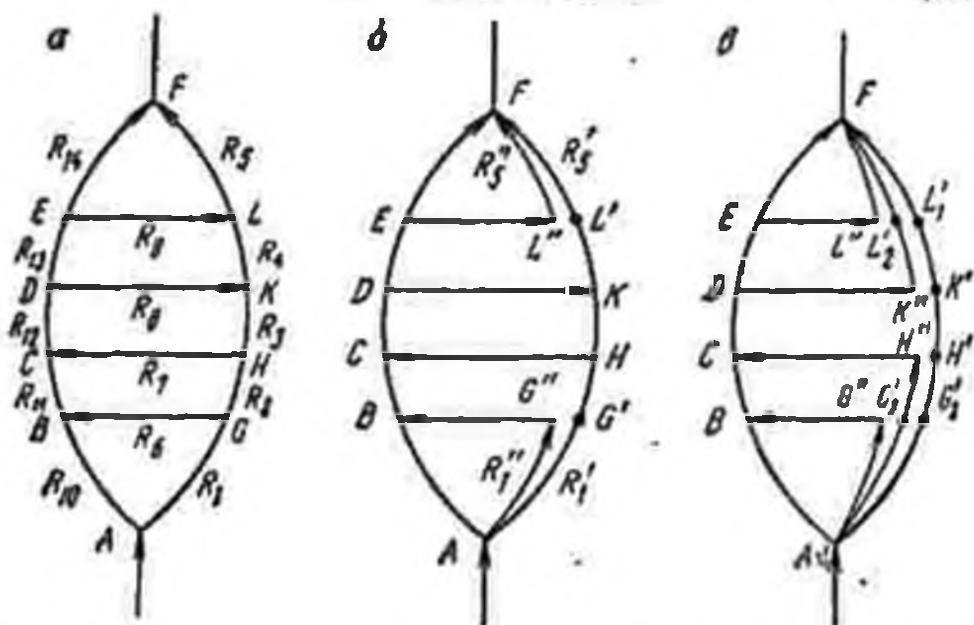


Рис. 6.8. Схемы преобразований системы диагонального соединения при движении воздуха в двух направлениях

Расходы воздуха при $i+1$ приближении определяются

$$Q_{K \cdot P, i+1} = Q_{AH', i+1} = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{R_{AH', i} + R_2 + R_{K \cdot P, i}}{R_{AH', i} + R_{12} + R_{DK \cdot P, i}}}}. \quad (6.51)$$

где $R_{AH', i}$ определяется по формуле (6.38), а $R_{DK \cdot P, i}$ равно:

$$R_{DK \cdot P, i} = \frac{R_2 + R_{K \cdot P, i}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2 + R_{K \cdot P, i}}{R_{12} + \frac{R_{11}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{11}}{R_2 + R_M}} \right)^2}}}} \right)^2}; \quad (6.52)$$

$$Q_{CD, i+1} = Q - Q_{AH', i+1} \quad (6.53)$$

$$Q_{\text{ЛП}^*, i+1} = \frac{Q_{\text{СД}, i+1}}{\sqrt{R_7 + R_{\text{ЛП}^* i}}}; \quad (6.54)$$

$$R_{11} + \frac{R_{12}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{12}}{R_8 + R_{11}}}\right)^2}$$

$Q_{i, i+1}$ определяется по формуле (6.41);

$$Q_{\text{ВС}, i+1} = Q_{\text{СД}, i+1} - Q_{\text{ЛП}^*, i+1}; \quad (6.55)$$

$Q_{i, i+1}$ определяется по формуле (6.43);

$$Q_{\text{К}^* \text{Р}, i+1} = \frac{Q_{\text{СД}, i+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_9 + R_{\text{К}^* \text{Р} i}}{R_{12} + \frac{R_{12}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{12}}{R_9 + R_{11}}}\right)^2}}}}}; \quad (6.56)$$

$$Q_{\text{В}, i+1} = Q_{\text{К}^* \text{Р}, i+1} + Q_{\text{К}^* \text{Р}, i+1}; \quad (6.57)$$

$$Q_{\text{ДВ}, i+1} = Q_{\text{СД}, i+1} - Q_{\text{К}^* \text{Р}, i+1}; \quad (6.58)$$

$$Q_{\text{В}}^* = \frac{Q_{\text{ДВ}, i+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_9 + R_{11}^*}{R_{12}}}}. \quad (6.59)$$

Первое приближение, как и в первом случае, берется исходя из равенства расходов воздуха, проходящих по «расщепленным» выработкам.

6.4. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ДИАГОНАЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫРАБОТОК МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Методами «расщепления», многократного «расщепления» выработок можно рассчитать и преобразовать довольно много видов сложных диагональных и комбинированных соединений. Однако существуют соединения, для которых указанные методы не применимы. К таким соединениям относятся сложные диагональные соединения, когда более чем по двум смежным диагоналям воздуха движется в противоположных направлениях.

Нами предлагается метод последовательных преобразований, позволяющий рассчитать и преобразовать любое диагональное соединение. Он заключается в многошаговом преобразовании диагональных соединений, сочетающем «расщепление» выработок с последующей заменой параллельных соединений эквивалентными выработками и повторным (часто многократным) «расщепле-

ниме выработок, в том числе и эквивалентных, заменивших параллельные соединения.

Рассмотрим метод на конкретном примере сложного диагонального соединения с пятью диагоналями при движении воздуха в противоположных направлениях во всех смежных диагоналях (рис. 6.10). Соединение преобразуется путем исключения диагоналей до вида, когда по верхним диагоналям воздух движется в одном направлении, а по всем нижним диагоналям — в другом.

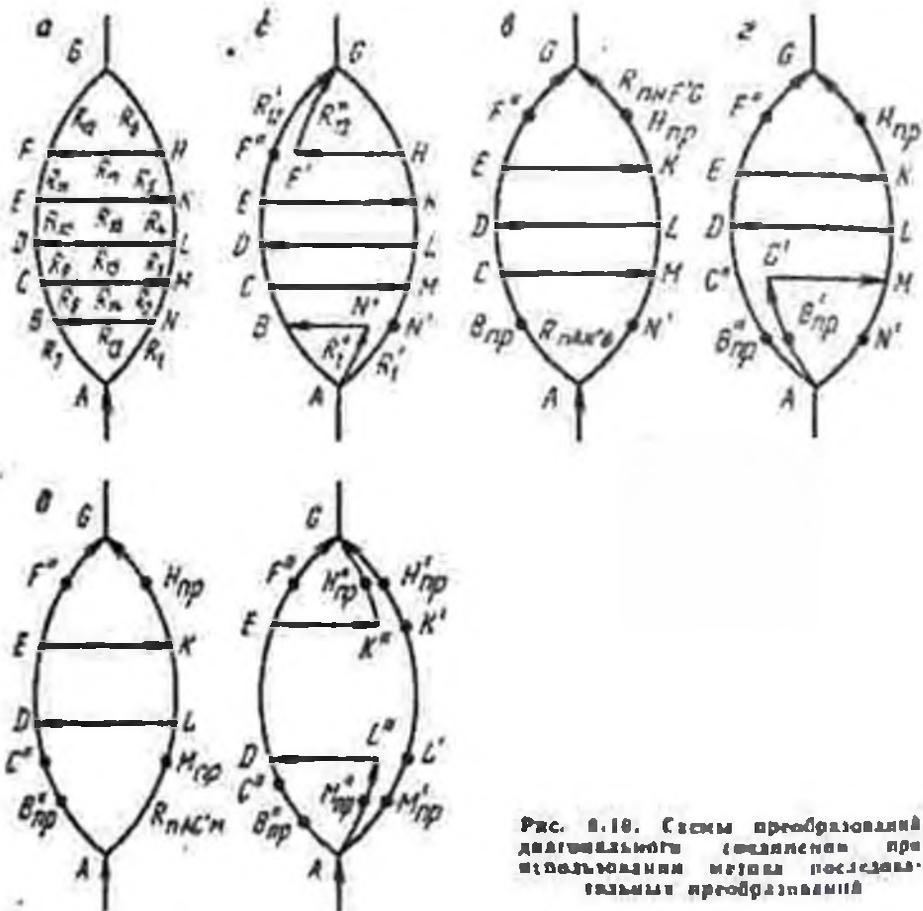


Рис. 6.10. Систем преобразований диагонального соединения при использовании метода последовательных преобразований

либо по всем диагоналям воздух движется в одном направлении. Для соединения на рис. 6.10, а упрощение должно производиться путем исключения трех диагоналей, т. е. до вида, представленного на рис. 6.10, д.

Дальше задача решается как для соединения с двумя диагоналями. Рассмотрим более подробно ход решения задачи.

1. Производится замена выработок AN и FG (с сопротивлениями R_{11} и R_{21}) эквивалентными выработками AN' , AN'' и $F'G$, $F''G$ (с сопротивлениями R_{11} , R_{11}' и R_{12} , R_{12}'). R_{11} , R_{11}' , R_{12} , R_{12}' определяются по формулам (6.10).

2. Параллельные соединения $H'F'G$ и $AN''B$ заменяются выработками $H''B$ и $AB_{пр}$, сопротивления которых равны со-

противлениям параллельных соединений, т. е. при i -м приближении:

$$R_{H_{np} \sigma_i} = R_{H_{np} \sigma_i} = \frac{R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_{12} + R_{12}'}}\right)^2}; \quad (6.60)$$

$$R_{AB_{np} i} = R_{AB_{np} i} = \frac{R_1}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_{12} + R_{12}'}}\right)^2}. \quad (6.61)$$

Точки B и B_{np} на выработке AC , H и H_{np} на выработке KG совпадают.

3. После указанных преобразований выработка AC заменяется двумя эквивалентными выработками AC' и AC'' . Аналогичную замену можно сделать для выработки EG .

При i -м приближении:

$$R_{AC' i} = (R_{AB_{np} i} + R_3) \left(1 + \frac{Q_{AC' i}}{Q_{AC' i}}\right)^2; \quad (6.62)$$

$$R_{AC'' i} = (R_{AB_{np} i} + R_3) \left(1 + \frac{Q_{AC'' i}}{Q_{AC'' i}}\right)^2. \quad (6.63)$$

4. Параллельное соединение $AC''M$ заменяется выработкой AM_{np} , сопротивление которой равно сопротивлению параллельного соединения, т. е. при i -м приближении

$$R_{AM_{np} i} = R_{AC'' M i} = \frac{R_{11}' + R_2}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{11}' + R_2}{R_{AC' i} + R_{11}'}}\right)^2}. \quad (6.64)$$

Точки M и M_{np} на выработке AL совпадают.

5. Выработки AL и KG заменяются выработками AL' , AL'' , $K'O$, $K''O$ с соответствующим преобразованием соединения.

При i -м приближении:

$$R_{AL' i} = (R_{AM_{np} i} + R_3) \left(1 + \frac{Q_{AL' i}}{Q_{AL' i}}\right)^2; \quad (6.65)$$

$$R_{AL'' i} = (R_{AM_{np} i} + R_3) \left(1 + \frac{Q_{AL'' i}}{Q_{AL'' i}}\right)^2; \quad (6.66)$$

$$R_{K'O i} = (R_{H_{np} \sigma_i} + R_3) \left(1 + \frac{Q_{K'O i}}{Q_{K'O i}}\right)^2; \quad (6.67)$$

$$R_{K''O i} = (R_{H_{np} \sigma_i} + R_3) \left(1 + \frac{Q_{K''O i}}{Q_{K''O i}}\right)^2. \quad (6.68)$$

6. Дальнейший порядок решения задачи совпадает с вышеизложенным.

Для $l + 1$ приближения:

$$Q_{K^{\circ}, l+1} = \frac{Q_{AL^{\circ}, l+1}}{Q} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{R_{AL^{\circ}, l} + R_4 + R_{K^{\circ}, l}}{R_{K^{\circ}, l} + R_{10}} + R_{10} + \left(1 + \sqrt{\frac{R_{K^{\circ}, l} + R_{10}}{R_{11} + R_{12}}}\right)^2 + \frac{R_{AL^{\circ}, l} + R_{10}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{AL^{\circ}, l} + R_{10}}{R_{AC^{\circ}, l} + R_9}}\right)^2}}}; \quad (6.69)$$

$$Q_{DF, l+1} = Q - Q_{AL^{\circ}, l+1}; \quad (6.70)$$

$$Q_{AL^{\circ}, l+1} = \frac{Q_{DF, l+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_{AL^{\circ}, l} + R_{10}}{R_{AC^{\circ}, l} + R_9}}}; \quad (6.71)$$

$$Q_{K^{\circ}, l+1} = \frac{Q_{DF, l+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_{K^{\circ}, l} + R_{10}}{R_{11} + R_{12}}}}; \quad (6.72)$$

$$Q_{ML, l+1} = Q_{AL^{\circ}, l+1} + Q_{K^{\circ}, l+1}; \quad (6.73)$$

$$Q_{AC^{\circ}, l+1} = Q - Q_{ML, l+1}; \quad (6.74)$$

$$Q_{AC^{\circ}, l+1} = \frac{Q_{ML, l+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_{AC^{\circ}, l} + R_{14}}{R_{11} + R_2}}}; \quad (6.75)$$

$$Q_{BC, l+1} = Q_{AC^{\circ}, l+1} + Q_{AC^{\circ}, l+1}; \quad (6.76)$$

$$Q_{KH^{\circ}, l+1} = Q_{i, l+1} = Q - Q_{BC, l+1}; \quad (6.77)$$

$$Q_{i, l+1} = \frac{Q_{BC, l+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_1 + R_{13}}{R_5}}}; \quad (6.78)$$

$$Q_{KH, l+1} = Q_{K^{\circ}, l+1} + Q_{K^{\circ}, l+1}; \quad (6.79)$$

$$Q_{CF, l+1} = Q_{i2, l+1} = Q - Q_{KH, l+1}; \quad (6.80)$$

$$Q_{i2, l+1} = \frac{Q_{KH, l+1}}{1 + \sqrt{\frac{R_{17} + R_{18}}{R_6}}}; \quad (6.81)$$

Первое приближение берется исходя из равенств расходов воздуха по «расщепленным» выработкам.

В пункте 6.7 (пример 3) приведено решение численного примера по расчету распределения воздуха, определению общего аэродинамического сопротивления и упрощению сложного диагонального соединения методом последовательных преобразований.

6.5 РАСЧЕТ МНОГОВЕНТИЛЯТОРНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПУТЕМ РАСЩЕПЛЕНИЯ НА НЕЗАВИСИМЫЕ ВЕНТИЛЯТОРНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим вентиляционную систему с четырьмя вентиляторами, работающими на сеть (рис. 6.11, а). Произведем «расщепление» выработок и преобразование вентиляционной системы до вида на рис. 6.11, б.

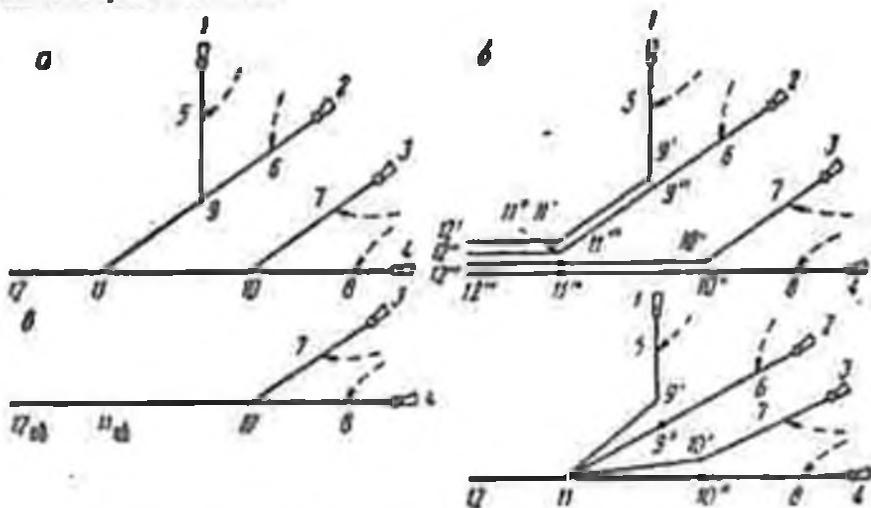


Рис. 6.11. Схемы преобразования отопительной системы

Выработки 11—12 с сопротивлением R_{11} заменяется четырьмя выработками 11'—12', 11''—12'', 11'''—12''', 11''''—12'''' с сопротивлениями $R_{11'}$, $R_{11''}$, $R_{11'''}$, $R_{11''''}$; выработка 9—11 с R_{11} — двумя выработками 9'—11', 9''—11'' с сопротивлениями $R_{11'}$, $R_{11''}$; выработка 10—11 с R_{11} заменяется двумя выработками 10'—11', 10''—11'' с сопротивлениями $R_{11'}$, $R_{11''}$.

Аэродинамические сопротивления расщепленных выработок при l -м приближении определяются из равенства

$$R_{Ml} = R_{(l+1)} \left(\frac{\sum_{i=1}^{m_1} k_i^{-1} Q_{li}}{k_i^{-1} Q_{li}} \right)^2 \quad (6.82)$$

где $s = 0$ — при расщеплении выработок 11—12 и 9—11, $s = 1$ — при расщеплении выработки 10—11, $m_1 = 1$; $m_1 = 4$ — при расщеплении выработки 11—12; $m_2 = 1$, $m_2 = 2$ — при расщеплении выработки 9—11; $m_3 = 3$, $m_3 = 4$ — при расщеплении

выработки 10—11; $k_i \approx 1 + \frac{n_i}{100}$ (n_i — внешние утечки воздуха, %); Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 — расходы воздуха по выработкам 5—1, 6—2, 7—3, 8—4, м³/с.

Расход воздуха при j -м приближении определяется по формуле

$$Q_{ij} = \frac{-b_{ij} \pm \sqrt{b_{ij}^2 - 4A_{ij}c_{ij}}}{2A_{ij}}, \quad (6.83)$$

$i = 1, 2, 3, 4,$

$$A_{ij} = b_{ij} - \left(\frac{R_{1ij} + R_{2ij} + R_{3ij}}{k_i^2} + R_{4ij} \right). \quad (6.84)$$

$R_{1ij}, R_{2ij}, R_{3ij}, R_{4ij}$ — аэродинамические сопротивления каналов вентиляторов 5—1, 6—2, 7—3, 8—4 кгс·с²/м⁶;

b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} — постоянные коэффициенты в уравнении, аппроксимирующем характеристику i -го вентилятора

$$h_i = b_{0i} + b_{1i}Q_i + b_{2i}Q_i^2, \quad (6.85)$$

где h_i — депрессия i -го вентилятора, кгс/м².

Расчет аэродинамических сопротивлений расщепленных выработок по выражению (6.82) производится до получения результата, отличающегося от предыдущего на величину, меньшую заданной степени точности. Одновременно с расчетом сопротивлений по выражению (6.83) при последнем приближении определяются производительности вентиляторов, т. е. $Q_{01} = Q_{1n}$; $Q_{02} = Q_{2n}$; $Q_{03} = Q_{3n}$; $Q_{04} = Q_{4n}$ (где n — последнее приближение, обеспечивающее заданную точность расчетов).

Это позволяет определить расход воздуха по выработкам:

$$12 - 11 - k_1^{-1}Q_{1n} + k_2^{-1}Q_{2n} + k_3^{-1}Q_{3n} + k_4^{-1}Q_{4n};$$

$$11 - 9 - k_1^{-1}Q_{1n} + k_2^{-1}Q_{2n};$$

$$11 - 10 - k_3^{-1}Q_{3n} + k_4^{-1}Q_{4n}.$$

Метод «расщепления» вентиляционной системы на независимые системы позволяет произвести проверку эффективности работы вентиляторов при наличии в системе более двух вентиляторов. После «расщепления» выработок эффективность совместной работы вентиляторов 3 и 4 проверяется в точке 10, вентиляторов 1, 2, 3 и 4 — в точке 11.

Для каждого вентилятора 3 и 4 определяется максимальная депрессия после приведения в точку 10:

$$h_{\max 10i} = h_{\max i} - R_{1i}Q_{\min i}^2 - R_{2i} \frac{Q_{\min i}^2}{\left(1 + \frac{n_i}{100}\right)^2}, \quad (6.86)$$

$$i = 3, 4,$$

где $h_{\max i} Q_{\min i}$ — максимальная депрессия для центробежного вентилятора или 0,9 от максимальной депрессии для осевого i -го вентилятора и соответствующая указанной депрессии минимальная производительность вентилятора (принимаются как координаты левой граничной точки рабочей части характеристики i -го вентилятора).

Минимальная из двух депрессий, приведенных в точку 10 вентиляторов,

$$h_{\max. \max} = \min \{h_{\max i}\} \quad (6.87)$$

сравнивается с депрессией точки пересечения характеристик общей ветви 12₀₀—11₀₀—10 (рис. 6.11, а), имеющей сопротивление R_{00} , с приведенной характеристикой вентилятора, имеющей большую максимальную депрессию. Должно соблюдаться неравенство

$$h_{\max. \max} > R_{00} \left(\frac{-b_{1i} \pm \sqrt{b_{1i}^2 - 4b_{0i}B_i}}{2B_i} \right), \quad (6.88)$$

где

$$R_{00} = \frac{R_{12} + R_{21}}{\left(1 + \sqrt{\frac{R_{12} + R_{27}}{R_{21} + R_{11}}}\right)^2};$$

$$B_i = b_{2i} - R_{2i} - \frac{R_w}{\left(1 + \frac{n_i}{100}\right)^2} - R_{00}.$$

Если $h_{\max 10.3} > h_{\max 10.4}$, то в неравенстве (6.88) $i = 3$, в противном случае $i = 4$.

При соблюдении неравенства (6.88) совместная работа вентиляторов 3 и 4 будет эффективной. Если неравенство (6.88) не соблюдается, нужно изменить режим работы вентиляторов или провести мероприятия по снижению депрессии сети. В первом случае необходимо увеличить угол установки лопаток вентилятора с меньшей максимальной приведенной депрессией или уменьшить угол установки лопаток вентилятора с большей приведенной максимальной депрессией. Снижение депрессии должно производиться прежде всего для ветви с сопротивлением R_{00} или для части сети, на которой работает вентилятор с большей максимальной депрессией после приведения в точку 10.

Максимальные депрессии вентиляторов 1, 2, 3 и 4, приведенных в точку 11, определяются из выражения

$$h_{\max 11i} = h_{\max i} - R_{1i}Q_{\min}^2 - (R_{2i} + R_{3i}) \frac{Q_{\min i}^2}{\left(1 + \frac{n_i}{100}\right)^2}; \quad (6.89)$$

$$i = 1, 2, 3, 4.$$

Совместная работа вентиляторов будет эффективной, если соблюдается неравенство (6.88), где $R_{00} = R_1$, b_{01} , b_{02} , b_{03} — по-

стоянные коэффициенты уравнения, аппроксимирующего характеристику вентилятора с наибольшей максимальной депрессией после приведения в точку II.

Если работа вентиляторов будет неэффективной, проводится мероприятие, указанные для вентиляторов 3 и 4.

В пункте 6.6 (пример 4) решен численный пример по «расщеплению» вентиляционной системы и проверке эффективности совместной работы вентиляторов.

6.6. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В СОЕДИНЕНИЯХ ВЫРАБОТОК МЕТОДОМ ФИКТИВНОГО ОБЩЕГО РАСХОДА ВОЗДУХА

Предлагаемый метод расчета распределения воздуха в сложных диагональных и комбинированных соединениях выработок не требует предварительного определения направления движения воздуха по диагоналям и внутренним выработкам. В систему уравнений, описывающих соединения, вводится общий расход воздуха, подходящего к соединению. Рассмотрим диагональное соединение, приведенное на рис. 6.12. Примем обозначения гидродинамических сопротивлений и расходов воздуха, показанные на рис. 6.12.

При увеличении числа диагоналей принцип обозначений расходов воздуха должен сохраняться, т. е. искомые расходы воздуха обозначаются для выработок по одной стороне соединения, для выработок по противоположной стороне расходы воздуха обозначаются в виде разности общего расхода воздуха Q и искомого расхода воздуха, по диагоналям расходы воздуха обозначаются как разность расходов по двум прилегающим выработкам.

Диагональное соединение описывается по контурам. Предварительно произвольно задаются направления движения воздуха по диагоналям. При направлениях движения воздуха по диагоналям, показанным на рис. 6.12, диагональное соединение описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 R_1 Q_1^2 &= R_0 (Q - Q_1)^2 + \frac{Q_2 - Q_1}{|Q_2 - Q_1|} R_2 (Q_2 - Q_1)^2; \\
 &\frac{Q_2 - Q_1}{|Q_2 - Q_1|} R_2 (Q_2 - Q_1)^2 + R_2 Q_1^2 + \\
 &+ \frac{Q_2 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_0 (Q_2 - Q_2)^2 = R_0 (Q - Q_2)^2; \\
 &\frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_0 (Q_1 - Q_2)^2 + R_{10} (Q - Q_2)^2 + \\
 &+ \frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_2 (Q_1 - Q_2)^2 = R_2 Q_2^2; \\
 &\frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_2 (Q_1 - Q_2)^2 + R_1 Q_1^2 = R_{11} (Q - Q_1)^2.
 \end{aligned}
 \tag{6.90}$$

Система уравнений (6.90) решается методом линеаризации. Решение системы уравнений одновременно дает возможность определить направление движения воздуха по диагоналям.

Если знак перед слагаемыми, содержащими $\frac{Q_2 - Q_1}{|Q_2 - Q_1|}$, $\frac{Q_1 - Q_2}{|Q_2 - Q_2|}$; $\frac{Q_1 - Q_2}{|Q_2 - Q_2|}$ после нескольких итераций становится постоянным, то направление движения соответствует первоначально принятому, если знак такой же, как в системе, и наоборот.

В пункте 6.7 (пример 5) приведено численное решение задачи по расчету распределения воздуха в сложном диагональном соединении методом прова общего расхода воздуха в систему уравнений.

Метод ведения общего расхода воздуха в систему уравнений, описывающих соединения, находит более важное приложение для комбинированных соединений.

Будем рассматривать комбинированное соединение, изображенное на рис. 6.5, а при неизвестных направлениях движения воздуха по выработкам BE , ED , EC . Для определения направления движения воздуха по выработкам комбинированного соединения, что необходимо для преобразования его путем «расщепления» выработок, а также при непосредственном расчете распределения воздуха, можно предварительно задаваться направлениями движения воздуха по внутренним выработкам от точки B к точке E , от точки C к E , от точки E к D . Тогда количество воздуха по выработкам можно обозначить следующим образом: $AC - Q_1$; $CD - Q_2$; $DF - Q_3$; $AB - (Q - Q_1)$; $BF - (Q - Q_2)$; $CE - (Q_1 - Q_2)$; $BE - (Q_1 - Q_1)$; $ED - (Q_2 - Q_2)$.

Комбинированное соединение (см. рис. 6.5, а) описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 R_1 Q_1^2 + \frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_4 (Q_1 - Q_2)^2 = & \\
 = R_7 (Q - Q_1)^2 + \frac{Q_2 - Q_1}{|Q_2 - Q_1|} R_8 (Q_2 - Q_1)^2 + & \\
 + \frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_4 (Q_1 - Q_2)^2 + & \\
 + \frac{Q_2 - Q_1}{|Q_2 - Q_2|} R_6 (Q_2 - Q_2)^2 = R_2 Q_2^2 & \\
 + \frac{Q_2 - Q_1}{|Q_2 - Q_1|} R_8 (Q_2 - Q_1)^2 + & \\
 + \frac{Q_2 - Q_1}{|Q_2 - Q_2|} R_8 (Q_2 - Q_2)^2 = R_2 (Q - Q_2)^2 &
 \end{aligned} \quad (6.91)$$

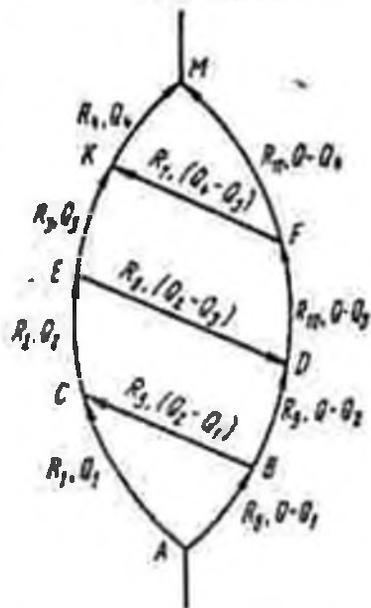


Рис. 6.13. Схема диагонального соединения выработки

Система трех уравнений (6.91) содержит три неизвестные Q_1 , Q_2 , Q_3 и решается методом линеаризации.

Решение системы уравнений дает возможность судить о направлении движения воздуха по внутренним выработкам. Воздух по выработке BE движется от B к точке E , если $Q_2 - Q_1 > 0$ от точки E к B , если $Q_1 - Q_2 < 0$; по выработке ED — от точки D к точке E , если $Q_1 - Q_2 > 0$, от точки D к точке E , если $Q_1 - Q_2 < 0$, по выработке EC от точки C к точке E , если $Q_1 - Q_2 > 0$, то точка E к точке C , если $Q_1 - Q_2 < 0$.

Направление движения воздуха можно определить после нескольких приближений до получения устойчивого знака перед слагаемыми — депрессиями внутренних выработок.

В качестве первого приближения при решении системы (6.91) можно принимать $Q_1 = Q_2 = Q_3 < Q$.

Ниже в пункте 6.7 (пример 6) приводится численный пример по расчету описанным методом комбинированного соединения, приведенного на рис. 6.5, а.

Рассмотрим комбинированное соединение, изображенное на рис. 6.5, б при неизвестных направлениях движения воздуха по выработкам BG , GE , CG и GD . Для определения направления движения воздуха по выработкам комбинированного соединения на рис. 6.5, б, что необходимо для преобразования его путем «расщепления» выработок, а также при непосредственном расчете распределения воздуха, можно во всех случаях предварительно задать направления движения воздуха по внутренним выработкам от B к G , от G к C , от D к G , от G к E . Тогда расходы воздуха по выработкам можно обозначить следующим образом: $AD = Q_1$; $DE = Q_2$; $EF = Q_3$; $BC = Q_4$; $AB = (Q - Q_1)$; $CF = (Q - Q_2)$; $BG = [(Q - Q_1) - Q_4]$; $GC = [(Q - Q_2) - Q_4]$; $DG = (Q_1 - Q_4)$; $GE = (Q_2 - Q_4)$.

Комбинированное соединение (см. рис. 6.5, б) описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 & R_1 Q_1^2 + \frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_7 (Q_1 - Q_2)^2 = \\
 & = R_8 (Q - Q_1)^2 + \frac{Q - Q_1 - Q_4}{|Q - Q_1 - Q_4|} R_9 (Q - Q_1 - Q_4)^2 + \\
 & \quad \frac{Q - Q_1 - Q_4}{|Q - Q_1 - Q_4|} R_6 (Q - Q_1 - Q_4)^2 + \\
 & \quad + \frac{Q - Q_2 - Q_4}{|Q - Q_2 - Q_4|} R_{10} (Q - Q_2 - Q_4)^2 = R_4 Q_4^2; \\
 & \frac{Q - Q_2 - Q_4}{|Q - Q_2 - Q_4|} R_{10} (Q - Q_2 - Q_4)^2 + R_8 (Q - Q_2)^2 = \\
 & = \frac{Q_2 - Q_4}{|Q_2 - Q_4|} R_6 (Q_2 - Q_4)^2 + R_7 Q_2^2; \\
 & \quad \frac{Q_1 - Q_2}{|Q_1 - Q_2|} R_7 (Q_1 - Q_2)^2 + \\
 & \quad + \frac{Q_2 - Q_4}{|Q_2 - Q_4|} R_6 (Q_2 - Q_4)^2 = R_7 Q_7^2.
 \end{aligned} \tag{6.92}$$

Воздух движется от В к С, если $Q - Q_1 - Q_2 > 0$, от С к В, если $Q - Q_1 - Q_2 < 0$, от С к В, если $Q - Q_2 - Q_1 > 0$ от В к С, если $Q - Q_2 - Q_1 < 0$, от С к Е, если $Q_2 - Q_1 > 0$, от Е к С, если $Q_2 - Q_1 < 0$, от D к G, если $Q_1 - Q_2 > 0$, от G к D, если $Q_1 - Q_2 < 0$.

Во всех случаях, когда определяется аэродинамическое сопротивление соединения, преобразовывается соединение или определяется направление движения воздуха по внутренним выработкам комбинированных и диагональных соединений и неизвестен расход воздуха соединения, предлагается использовать метод фиктивного общего расхода воздуха.

Так, для определения аэродинамического сопротивления простого диагонального соединения предварительно можно произвести расчет распределения воздуха по методике, изложенной в пункте б.1, приняв в качестве Q любое число, удобное для расчета.

Для расчета аэродинамического сопротивления сложного диагонального соединения, если известен расход воздуха по соединению предварительно можно произвести расчет распределения воздуха по методике, изложенной в начале пункта б.б, приняв фиктивное значение Q .

Для расчета аэродинамических сопротивлений комбинированных соединений предварительно производят расчет распределения воздуха по методике, изложенной в начале пункта б.б, приняв за общий расход воздуха любую величину.

Во всех случаях аэродинамическое сопротивление соединения при естественном распределении воздуха определится как сумма депрессий выработок по любому направлению, разделенная на Q^2 . Метод фиктивного общего расхода воздуха применим для определения направления движения воздуха в комбинированных и сложных диагональных соединениях. Принимая в качестве Q любое удобное число, производят расчет по методике, изложенной в начале пункта б.б до получения устойчивого знака перед слагаемыми, относящимися к выработкам, направления движения воздуха по которым могут измениться.

Метод фиктивного общего расхода воздуха может использоваться при расчете и упрощении диагональных и комбинированных соединений путем «расщепления» выработок, многократного «расщепления» и при применении метода линеаризации.

6.7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример 1. Рассчитать простое диагональное соединение с применением метода Феррари

Разделим все коэффициенты уравнения (6.4) на b_1 и приведем уравнение к виду

$$f(y) = y^4 + a_3 y^3 + a_2 y^2 + a_1 y + a_0 = 0. \quad (6.93)$$

Уравнение (6.93) можно решить методом Феррари. Изложение метода решения будем иллюстрировать конкретным численным примером. Пусть $R_1 = R_2 = R_3 = 1$; $R_4 = 2$; $R_5 = 0,5$ кгс·с²/м⁴.

Общий расход воздуха по диагональному соединению $Q = 50$ м³/с.

Тогда уравнение (6.93) запишется в виде

$$y^4 - 4y^3 - 26y^2 + 28y + 81 = 0. \quad (6.94)$$

Произведем в уравнении (6.93) замену переменного

$$y = z - \frac{a_3}{4}.$$

Для этого многочлен (6.93) разлагается по степеням

$$y + \frac{a_3}{4}. \quad (6.95)$$

что проще сделать с помощью схемы Горнера.

Заменив $y + \frac{a_3}{4}$ через z , получим уравнение

$$z^4 + pz^3 + qz^2 + r = 0. \quad (6.96)$$

Произведем замену переменного в численном примере

$$y = z - \frac{(-4)}{4} = z + 1; \quad z = y - 1.$$

Разложим многочлен

$$f(y) = y^4 - 4y^3 - 26y^2 + 28y + 81$$

по степеням $y - 1$.

1	-4	-26	28	81	
1	1-4=-3	-3-26=-29	-29+28=-1	-1+81=80	
1	1-3=-2	-2-29=-31	-31-1=-32		
1	1-2=-1	-1-31=-32			
1	1-1=0				
1					

Заменив $y - 1$ через z , получим

$$z^4 - 32z^3 - 30z^2 + 80 = 0. \quad (6.97)$$

Составим кубическую резольвенту уравнения (6.97)

$$u^3 + 2pu^2 + (p^2 - 4r)u - q^2 = 0 \quad (6.98)$$

и найдем ее корни.

Для численного примера резольвента

$$u^3 - 64u^2 + 704u - 1024 = 0. \quad (6.99)$$

Нахождение корней уравнения (6.98) также производится путем замены переменного

$$u = t - \frac{2p}{3}. \quad (6.100)$$

Обозначим $u + \frac{2p}{3}$ через t , получим

$$t^3 + p_1 t + q_1 = 0. \quad (6.101)$$

Для численного примера

$$u = t + \frac{64}{3}.$$

Разложим многочлен

$$f(u) = u^3 - 64u^2 - 704u - 1024$$

по степеням $u - \frac{64}{3}$.

$$\begin{aligned} \frac{64}{3} \mid \frac{64}{3} & - 64 = -\frac{128}{3}; & \frac{64}{3} \mid 704 & = \frac{1856}{9}; & -\frac{1856}{9} \mid -\frac{1856}{9} \cdot \frac{64}{3} & - \\ & & & & - 1024 & = 5423,41 \\ \frac{64}{3} \mid -\frac{128}{3} & = -\frac{64}{3}; & -\frac{64}{3} \mid \frac{64}{3} & = \frac{1856}{9} & = -661,33 \\ \frac{64}{3} \mid \frac{64}{3} & = 0 \end{aligned}$$

Заменяя $u - \frac{64}{3}$ через t , получим

$$t^3 - 661,33t - 5423,41 = 0. \quad (6.102)$$

Уравнение (6.101) является кубическим уравнением с действительными коэффициентами.

Дискриминант уравнения (6.101) определяется

$$D = -108 \left[\left(\frac{q_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{p_1}{3} \right)^3 \right]. \quad (6.103)$$

Для численного примера

$$\begin{aligned} D &= -108 \left[\left(-\frac{5423,41}{2} \right)^2 + \left(-\frac{661,33}{3} \right)^3 \right] = \\ &= -108 (574096,12 - 10712015,07) > 0. \end{aligned}$$

Дискриминант положительный, поэтому все корни уравнения (6.101) для численного примера являются действительными.

В этом случае корни находятся по формуле

$$t_k = 2 \sqrt{\frac{-p}{3}} \cos \frac{\varphi + 2k\pi}{3}, \quad (6.104)$$

где $k = 1, 2, 3$;

φ — наименьший положительный угол, удовлетворяющий условию

$$\cos \varphi = -\frac{q_1}{2} \sqrt{-\left(\frac{3}{p_1}\right)^3}.$$

При $D < 0$ уравнение (6.101) имеет один действительный и два сопряженных комплексных корня.

Действительный корень уравнения (6.101) в этом случае можно найти по формуле Кардано

$$t_1 = \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} + \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q_1}{2} - \sqrt{\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27}}}. \quad (6.105)$$

При $D = 0$ все корни уравнения (6.101) действительные, причем два из них равны между собой.

Корни вычисляются по формулам

$$t_1 = \frac{3q_1}{p_1}; \quad t_2 = t_3 = -\frac{3q_1}{2p_1}. \quad (6.106)$$

Примем $k = 1$ и вычислим корень уравнения (6.101) по формуле (6.104):

$$t_1 = 2 \sqrt{-\frac{(-661,33)}{3}} \cos \frac{\varphi + 2\pi}{3}; \quad \cos \varphi = 0,8286;$$

$$\varphi = 34^\circ 3';$$

$$t_1 = 2 \sqrt{220,44} \cos \frac{34^\circ 3' + 2\pi}{3} = 9,5.$$

По значению t_1 найдем значение u_1 как корень уравнения (6.98).

В нашем численном примере

$$u_1 = t_1 - \frac{2p}{3} = 11,83.$$

После нахождения одного из корней уравнения (6.98) составляются два квадратных уравнения:

$$\omega^2 - \sqrt{u_k} \omega + \left(\frac{p+u_k}{2} + \frac{q}{2\sqrt{u_k}}\right); \quad (6.107)$$

$$\omega^2 - \sqrt{u_k} \omega + \left(\frac{p+u_k}{2} + \frac{q}{2\sqrt{u_k}}\right). \quad (6.108)$$

Корни уравнений (6.107) и (6.108) служат корнями уравнения (6.97). Для численного примера квадратные уравнения

$$\omega^2 - 3,44\omega - 14,74 = 0,$$

$$\omega^2 + 3,44\omega - 5,44 = 0.$$

Найдем один из корней уравнения (6.107) и (6.108)

$$\omega = 1.72 + \sqrt{1.72^2 + 14.74} = 6.93. \quad (6.109)$$

Тогда искомые значения x и y будут $y = 6.93$; $x = 5.79$.

$$Q_1 = \frac{Q}{x+y+1} = 3.64; \quad Q_1 = Q_2 x = 21.10.$$

$$Q_1 = Q_2 y = 25.26 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6.110)$$

Пример 2. Рассчитать распределение воздуха в простом диагональном соединении методом ввода общего расхода воздуха в систему уравнений.

Аэродинамические сопротивления $R_1 = 0.080$, $R_2 = 0.035$, $R_3 = 0.105$, $R_4 = 0.060$, $R_5 = 0.057$ кгс·с²/м⁵. Общий расход воздуха $Q = 30$ м³/с; $a_1 = 0.002$, $a_2 = -0.0034$, $a_3 = 0.174$; $a_4 = 0.22$, $a_5 = 2.605$; $b_1 = -0.0000001$; $b_2 = -0.000035$; $b_3 = 0.0064$; $b_4 = -0.2867$; $b_5 = 2.863$

или

$$Q_1^4 + 345.8Q_1^3 - 63814.3Q_1^2 + 2867282.2Q_1 - 28630955.6 = 0 \quad (6.111)$$

Составим приблизительную схему:

$$\begin{array}{ccccccc} Q_1 & \cdot & \dots & \dots & \dots & 10 & 15 \\ \text{Знак } f(Q_1) & \cdot & \dots & \dots & \dots & - & + \end{array}$$

Корень уравнения (6.111) находится на отрезке [10, 15]. Расчеты по уточнению корней уравнения сведены в табл. 6.2. Согласно данным табл. 6.2, $Q_1 = 14.01$ м³/с. Тогда $Q_2 = 3.19$.

Таблица 6.2

	Q_{1n}	$f(Q_{1n})$	$f'(Q_{1n})$	$\Delta Q_{1n} = -\frac{f(Q_{1n})}{f'(Q_{1n})}$
Q_{10}	15	1237750.9	1099768.2	-1.12
Q_{11}	33.88	-174845.79	1306318.50	+0.13
Q_{12}	14.01	3631.54	1293825.90	-0.0002

Пример 3. Преобразовать сложное диагональное соединение, приведенное на рис. 6.10, и рассчитать распределение воздуха в соединении методом последовательных преобразований.

Условия примера.

$$R_1 = 0.08, \quad R_2 = 0.06, \quad R_3 = 0.03, \quad R_4 = 0.1, \quad R_5 = 0.05,$$

$$R_6 = 0.06, \quad R_7 = 0.03, \quad R_8 = 0.01, \quad R_9 = 0.08, \quad R_{10} = 0.04,$$

$$R_{11} = 0.07, \quad R_{12} = 0.05, \quad R_{13} = 0.005, \quad R_{14} = 0.1, \quad R_{15} = 0.08,$$

$$R_{16} = 0.08, \quad R_{17} = 0.06 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^5, \quad Q = 30 \text{ м}^3/\text{с}$$

С достаточной точностью получено распределение воздуха и аэродинамические сопротивления выработок при 15-м приближении:

$$Q_{K'O} = Q_{AL} = 11,95, \quad Q_{O\Gamma} = 18,05, \quad Q_{AL} = 4,91,$$

$$Q_{K'O} = 4,30 \quad Q_{ML} = 16,86, \quad Q_{AC} = 13,14, \quad Q_{AC} = 6,46,$$

$$Q_{MC} = 19,60 \quad Q_i = Q_{M.M'} = 10,40, \quad Q_i = 1,36, \quad Q_{KH} = 16,25,$$

$$Q_{EF} = Q_{i2} = 13,75, \quad Q_{i2} = 2,01 \text{ м}^3/\text{с}, \quad R_1 = 0,104,$$

$$R_1 = 5,301, \quad R_{i2} = 0,066, \quad R_{i2} = 2,941, \quad R_{H,op} = 0,046,$$

$$R_{AB,op} = 0,026, \quad R_{AC} = 0,328, \quad R_{AC} = 0,080, \quad R_{AM,op} = 0,063,$$

$$R_{AL} = 0,188, \quad R_{AL} = 1,062, \quad R_{K'O} = 0,180,$$

$$R_{K'O} = 1,314 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4.$$

Пример 4. Произвести «расщепление» вентиляционной системы, приведенной на рис. 6.11, а, на индивидуальные вентиляционные системы для каждого вентилятора и проверить эффективность совместной работы вентиляторов 3 и 4 в точке 10 и вентиляторов 1, 2, 3 и 4 в точке 11. В табл. 6.3 приведены параметры вентиляторов 1, 2, 3 и 4.

Таблица 6.3

Вентилятор	Вентилятор	Частота вращения, об/мин	Угол поворота лопаток, градус	Уравнение	$Q_{\text{шт}}$ при $h_{\text{шт}}$ для детробожики и при 0,9 $h_{\text{шт}}$ для остальных вентиляторов
1	ВН4-100/450	376	60	$h = 620 - 0,030 Q^2$	50
2	ВСКД-1,5	985	40	$h = 600 - 11,11 Q$	35
3	ВЦБ-200/450	300	50	$h = 485 - 0,0045 Q^2$	80
4	ВСКД-1,8	980	30	$h = 1003 - 13,10 Q$	48

Аэродинамические сопротивления выработок:

$$11-12-R_1 = 0,0012; \quad 9-11-R_2 = 0,003; \quad 10-11-R_3 = 0,007;$$

$$5-9-R_{21} = 0,024; \quad 6-9-R_{22} = 0,01; \quad 7-10-R_{23} = 0,02;$$

$$8-10-R_{24} = 0,03; \quad 1-5-R_{41} = 0,0015; \quad 2-6-R_{42} = 0,006;$$

$$3-7-R_{43} = 0,001; \quad 4-8-R_{44} = 0,03 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4.$$

Внешние утечки воздуха $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 10\%$. Путем последовательных приближений получены аэродинамические сопротивления расщепленных выработок: $R_{11} = 0,0128$; $R_{12} = 0,0607$; $R_{13} = 0,0090$; $R_{14} = 0,0336$; $R_{21} = 0,0064$; $R_{22} = 0,0301$; $R_{23} = 0,0161$; $R_{24} = 0,0603 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Произведена проверка эффективности совместной работы вентиляторов 3 и 4: $h_{\text{max } 10 \text{ и }} = 344,1$, $h_{\text{max } 10 \text{ и }} = 148,1 \text{ кгс}/\text{м}^3$.

Правая часть формулы (6.88) равна 150,77. Так как $h_{\text{max. max}} = h_{\text{max. min}} = 150,77$, то совместная работа вентиляторов 3 и 4 будет неэффективной.

Произведена проверка эффективности совместной работы вентиляторов 1, 2, 3 и 4: $h_{\text{max. min}} = 378,5$; $h_{\text{max. max}} = 163,13$; $h_{\text{max. min}} = 258,44$; $h_{\text{max. max}} = 132,74$ кгс/м².

Правая часть формулы (6.88) равна 11,52: $h_{\text{max. max}} = h_{\text{max. min}} > 11,52$, поэтому совместная работа вентиляторов 1, 2, 3 и 4 будет эффективной.

Одновременно с расщеплением выработок производится расчет распределения воздуха в вентиляционной системе.

Производительности вентиляторов будут: $Q_{b1} = 88,3$, $Q_{b2} = 40,7$, $Q_{b3} = 106$, $Q_{b4} = 54,7$ м³/с.

Для выработки 12—11 расход воздуха

$$K_1^{-1}Q_1 + K_5^{-1}Q_2 + K_5^{-1}Q_3 + K_4^{-1}Q_4 = 263,4 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для выработки 11—9 расход воздуха

$$K_1^{-1}Q_1 + K_5^{-1}Q_2 = 117,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для выработки 11—10 расход воздуха

$$K_3^{-1}Q_3 + K_4^{-1}Q_4 = 146,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Пример 5. Рассчитать распределение воздуха в сложном диагональном соединении, приведенном на рис. 6.12, методом ввода в систему уравнений общего расхода воздуха при следующем аэродинамическом сопротивлении выработок:

$$R_1 = 0,4, \quad R_2 = 0,2, \quad R_3 = 0,1, \quad R_4 = 0,05, \quad R_5 = 0,05,$$

$$R_6 = 0,2, \quad R_7 = 0,1, \quad R_8 = 0,3, \quad R_9 = 0,2, \quad R_{10} = 0,04,$$

$$R_{11} = 0,05 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8.$$

Общий расход воздуха $Q = 20$ м³/с.

Примем направление движения воздуха по диагоналям, показанное на рис. 6.12.

Первое приближение принимается $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 10$ м³/с.

Для решения системы уравнений (6.90) при втором приближении составляется расширенная матрица, которая эквивалентными преобразованиями приводится к треугольному виду:

$$\begin{pmatrix} -6,964 & 0,0316 & 0 & 0 & 0,028 \\ -0,036 & 4,411 & -0,375 & 0 & -0,364 \\ 0 & 0,375 & -1,749 & 0,187 & 0,047 \\ 0 & 0 & 0,187 & 1,187 & -0,176 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & -0,0045 & 0 & 0 & -0,004 \\ 0 & 1 & -0,085 & 0 & -0,082 \\ 0 & 0 & 1 & -0,109 & -0,045 \\ 0 & 0 & 0 & 6,457 & -0,896 \end{pmatrix}$$

Таблица 6.4

Номер средн.- жизни	Изменен депрессий				Изменен расходов воздуха				Расходм воздуха			
	Δh_{21}	Δh_{31}	Δh_{41}	Δh_{51}	ΔQ_{21}	ΔQ_{31}	ΔQ_{41}	ΔQ_{51}	Q_{21}	Q_{31}	Q_{41}	Q_{51}
1	-10	0	-6	0	-0,714	0	-1,875	0	10	10	10	10
2	-0,056	+0,728	-0,094	+0,352	-0,004	-0,067	-0,06	-0,139	9,286	10	8,125	10
3	+0,019	+0,007	+0,2	+0,045	0,001	0,001	0,056	0,01	9,282	9,913	8,065	9,861
4	-	-	-	-	-	-	-	-	9,283	9,917	8,121	9,871

Таблица 6.5

Номер средн.- жизни	Изменен депрессий			Изменен количества воздуха			Количество воздуха		
	Δh_1	Δh_2	Δh_3	ΔQ_{21}	ΔQ_{31}	ΔQ_{41}	Q_{21}	Q_{31}	Q_{41}
1	-10	20	20	1,67	-5	-1,25	10	10	10
2	+20,10	-22,64	+7,59	-1,51	1,18	0,05	11,67	5	8,75
3	-2,16	-3,50	+5,34	0,15	0,14	-0,23	10,16	6,18	8,80
4	+1,25	+0,27	-1,06	-0,20	-0,09	0,06	10,61	6,62	8,57
5	-0,58	-0,58	+0,60	0,11	0,11	0,009	10,41	6,53	8,63
6	-	-	-	-	-	-	10,52	6,64	8,64

$$\Delta Q_{12} = -0,139; \quad \Delta Q_{23} = -0,045 + 0,109(-0,139) = -0,06;$$

$$\Delta Q_{34} = -0,082 + 0,085(-0,06) = -0,087;$$

$$\Delta Q_{45} = -0,004 + 0,0045(-0,087) = -0,004.$$

Определим невязки расходов воздуха третьего приближения:

$$\begin{pmatrix} -6,959 & 0,031 & 0 & 0 & | & -0,009 \\ -0,031 & 4,4 & -0,37 & 0 & | & -0,003 \\ 0 & 0,37 & -1,833 & 0,18 & | & -0,1 \\ 0 & 0 & 0,18 & 1,18 & | & -0,022 \end{pmatrix} \approx$$

$$\approx \begin{pmatrix} 1 & -0,004 & 0 & 0 & | & 0,001 \\ 0 & 1 & -0,084 & 0 & | & -0,001 \\ 0 & 0 & 1 & -0,1 & | & 0,055 \\ 0 & 0 & 0 & 6,655 & | & 0,067 \end{pmatrix}$$

$$\Delta Q_{12} = 0,01, \quad \Delta Q_{23} = 0,055 + 0,1 \cdot 0,01 = 0,056;$$

$$\Delta Q_{34} = -0,001 + 0,084 \cdot 0,056 = 0,004;$$

$$\Delta Q_{45} = 0,001 + 0,004 \cdot 0,004 = 0,001.$$

Последовательность приближений приведена в табл. 6.4.

Итак, с достаточной точностью $Q_1 = 9,28$, $Q_2 = 9,92$, $Q_3 = 8,12$, $Q_4 = 9,87$ м³/с.

По диагоналим: $BC - Q_{BC} = 0,64$ м³/с, $DE - Q_{DE} = 1,8$ м³/с, $FK - Q_{FK} = 0,87 - 8,12 = 1,75$ м³/с.

Пример 6. Рассчитать распределение воздуха в комбинированном соединении, приведенном на рис. 6.5, а, методом ввода в систему общего расхода воздуха при неизвестном направлении движения воздуха по внутренним выработкам.

Условия примера:

$$R_1 = 0,01, \quad R_2 = 0,02, \quad R_3 = 0,05, \quad R_4 = 0,04, \quad R_5 = 0,03,$$

$$R_6 = 0,07, \quad R_7 = 0,02, \quad R_8 = 0,03 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^3.$$

Общий расход воздуха $Q = 20$ м³/с.

Последовательность приближений приведена в табл. 6.6.

Итак, с достаточной точностью $Q_1 = 10,52$ м³/с, $Q_2 = 6,64$ м³/с, $Q_3 = 8,64$ м³/с.

Воздух по выработке BE движется от точки E к точке B , так как $Q_2 - Q_1 < 0$, по выработке ED — от точки E к точке D , так как $Q_2 - Q_3 > 0$, по выработке EC — от точки C к точке E , так как $Q_1 - Q_3 > 0$.

7. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

7.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРИ ЗАДАННЫХ ВЕНТИЛЯТОРАХ И ТРУБОПРОВОДЕ

Математическая модель вентиляционной системы позволяет решить ряд задач для тупиковых выработок с вентиляторами местного проветривания. Может быть установлена предельная длина вентиляционного трубопровода при заданном количестве воздуха, поступающем в конце трубопровода.

Математической моделью вентиляционной системы при жестком (металлическом) трубопроводе будет уравнение

$$r\rho Q_0^2 = n(b_0 - b_1\rho^2 Q_0^2), \quad (7.1)$$

где r — коэффициент утечек воздуха в вентиляционном трубопроводе;

r — удельное аэродинамическое сопротивление плотного вентиляционного трубопровода, кгс с²/м⁶;

l — длина трубопровода, м;

Q_0 — расход воздуха, который необходимо подавать в забой подготовительной выработки, м³/с;

n — количество вентиляторов одного типа, последовательно работающих на трубопровод;

b_0, b_1 — коэффициенты в формуле, описывающей характеристику вентилятора.

Для всех и ниже рассматриваемых задач относятся к одиночной работе вентилятора на трубопровод, если положить $n = 1$.

Зависимость коэффициента утечек воздуха от длины жесткого трубопровода выражается следующей формулой [83]:

$$r = 1 + \frac{1}{3} l - \frac{5l^2}{6} R, \quad (7.2)$$

где

$$l = \sqrt[3]{\frac{rR^2}{2}}.$$

k — удельный коэффициент утечек воздуха (утечки воздуха на 1 м при разности давлений 1 кгс/м²), $k = k_y \frac{d_{tp}}{m}$;

k_y — коэффициент удельной стыковой воздухопроницаемости при оценке действующего металлического трубопровода;

d_{tp} — диаметр трубопровода, м;

m — длина звена трубопровода, м.

Подставляя r из (7.1) в (7.2), получим уравнение 4-й степени

$$A_1 l^4 + B_1 l^3 + C_1 l^2 + D_1 l + E_1 = 0, \quad (7.3)$$

где

$$A_1 = \frac{25}{36} n b_2 l^4, \quad B_1 = \frac{5}{6} r l^3 + \frac{5}{9} n b_2 l^3,$$

$$C_1 = \frac{r l}{3} + n \frac{\Delta_2 l^2}{9} + \frac{5}{3} n b_2 l^2,$$

$$D_1 = r + \frac{2}{3} n b_2 l, \quad E_1 = n b_2 - \frac{n^2 \Delta_2}{Q_2^2}.$$

Корень уравнения (7.3) и определяет максимальную длину трубопровода l , на которую данный вентилятор может подать заданный расход воздуха Q_2 . При значениях $b_0 = 374.1$, $b_1 = 17.5$ для металлического трубопровода диаметром 0,5 м и $Q_2 = 2$ м³/с уравнение (7.3) запишется в виде

$$l^4 + 1,3 \cdot 10^3 l^3 + 6,87 \cdot 10^3 l^2 + 3,57 \cdot 10^4 l - 2,8 \cdot 10^5 = 0. \quad (7.4)$$

Решение уравнения (7.4) можно производить одним из приближенных методов. Для определения числа положительных корней воспользуемся теоремой Декарта, согласно которой число положительных корней алгебраического уравнения равно числу перемен знаков в системе коэффициентов при неизвестных или меньше этого числа на четное число. В уравнении (7.4) одной перемене знаков соответствует один положительный корень.

Для отделения корней составим приближительную схему:

$$\begin{array}{ccccccc} l & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 100 & 300 & 400 \\ \text{Знак } f(l) & \dots & \dots & \dots & \dots & - & - & - & + \end{array}$$

Действительный положительный корень уравнения находится на интервале (300, 400). Для нахождения корня уравнения используем метод Ньютона (метод касательных).

Операции приближения по нахождению корня уравнения (7.4) сведен в табл. 7.1.

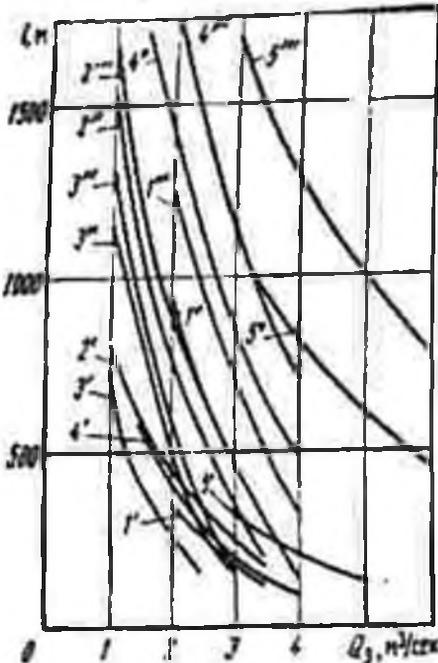
Итак, за исковую длину вентиляционного трубопровода можно принять $l = 350$ м.

Таблица 7.1

l_n	$f(l_n)$	$f'(l_n)$	$\Delta l = -\frac{f(l_n)}{f'(l_n)}$
400	$856 \cdot 10^4$	$179,8 \cdot 10^3$	-47,6
352,5	$480 \cdot 10^3$	$160,8 \cdot 10^3$	-3
349,5	0	—	—

На рис 7.1 приведены графики зависимости максимально возможной длины металлического трубопровода от количества воздуха, поступающего в забой выработки, при различных диаметрах трубопровода и типах вентиляторов.

Формула (7.1) позволяет также определить, какой расход воздуха будет подаваться n заданных последовательно установленных вентиляторов по данному жесткому трубопроводу в забой при фиксированной длине его



$$Q_3 = \sqrt{\frac{nb_0}{Rp + nb_1 p^3}} \quad (7.5)$$

Формула (7.1) позволяет определить необходимое число последовательно установленных вентиляторов одного типа, для которого найдены значения b_0 и b_1 .

$$n = \frac{RpQ_3^2}{b_0 - b_1 p^2 Q_3^2} \quad (7.6)$$

В формулах (7.5) и (7.6) $R = rl$ — аэродинамическое сопротивление трубопровода.

Более сложной задачей является определение необходимого диаметра трубопровода при заданном вентиляторе, из числа n фиксированных значений Q_3 , l . Этот диаметр определяется как корень уравнения 7-й степени вида:

$$A_7 d_{tp}^7 + B_7 d_{tp}^6 + C_7 d_{tp}^5 + D_7 d_{tp}^4 + E_7 d_{tp}^3 + F_7 d_{tp}^2 + G_7 d_{tp} + H_7 = 0 \quad (7.7)$$

где

$$A_7 = nb_1 Q_3^2 - nb_0; \quad B_7 = 0,67nb_1 Q_3^2 l^2; \quad C_7 = 1,78nb_1 Q_3^2 l^3;$$

$$D_7 = 0,55nb_1 Q_3^2 l^4; \quad E_7 = 0,69nb_1 Q_3^2 l^5; \quad F_7 = 6,5al Q_3^2;$$

$$G_7 = 2,17al^2 l Q_3^2; \quad H_7 = 5,04al^3 l^2 Q_3^2;$$

$$l_3 = \sqrt{3,25 \frac{a l^2}{m}}$$

* Расчет точек на графиках (рис.7.1 и 7.2) произведен инж. И. М. Капщукон.

Уравнение (7.7) можно решить методом Ньютона. Однако определение диаметра из уравнения (7.7) предполагает, что коэффициент α не зависит от диаметра, поэтому может возникнуть необходимость уточнения диаметра по новому коэффициенту α .

Менее трудоемким будет нахождение диаметра путем решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{тр}} &= \left(\frac{6,521 \rho Q_2^2}{\pi (b_0 - b_p^2 Q_2^2)} \right)^{0,2}; \\ p &= \left(\frac{1}{3} k_\gamma \frac{l}{m} d_{\text{тр}} \sqrt{R} + 1 \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

Система уравнений решается методом итераций. Вместо второй формулы системы (7.8) можно использовать формулу (7.2), сохраняя описанный порядок решения системы уравнений.

Для гибкого трубопровода типа «М» вентиляционная система опишется уравнением

$$R_\gamma p^2 Q_2^2 = \pi (b_0 - b_p^2 Q_2^2), \quad (7.9)$$

где R_γ — аэродинамическое сопротивление гибкого трубопровода с учетом утечек воздуха, кгс с²/м⁶.

Зависимость коэффициента утечек воздуха p от длины трубопровода l (при $l < 1200$ м) можно описать линейным уравнением вида

$$p = 1,04 + 0,0005l. \quad (7.10)$$

Аэродинамическое сопротивление гибкого трубопровода с учетом утечек воздуха описывается линейным уравнением вида

$$R_\gamma = f_1 (d + c l), \quad (7.11)$$

где f_1 — коэффициент, учитывающий степень натяжения прорезиненных труб (для слабо натянутых труб со складками $f_1 = 1,25$, для нормально натянутых, почти прямолинейных труб с волнами и небольшими складками $f_1 = 1,0$);

d, c — постоянные коэффициенты, значение которых приводится в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Диаметр труб, мм	Коэффициенты		Границы существования формул
	d	c	
400	9,7	0,23	$100 < l < 400$ м
500	6	0,065	$100 < l < 1200$ м
600	2,42	0,025	$100 < l < 1200$ м

Подставляя значения p и R_y из формул (7.10) и (7.11) в формулу (7.9), получим уравнение 3-й степени

$$FR^3 + KR + Ml + N = 0; \quad (7.12)$$

где $F = 2,5 \cdot 10^{-7} / c$; $K = 2,5 \cdot 10^{-7} (f, d + nb_2) + 1,04 \cdot 10^{-7} / c$; $M = 1,04 \cdot 10^{-7} (f, d + nb_2) + 1,0816 / c$; $N = 1,0816 (f, d + nb_2) - \frac{nb_2}{Q_2^2}$.

Из уравнения (7.12) определяется максимальная длина, на которую данный вентилятор может подать заданный расход воздуха.

Уравнение (7.12) можно решить одним из приближенных методов, в частности методом Ньютона.

На рис. 7.2 приведены графики зависимости максимально возможной длины гибкого трубопровода от расхода воздуха, поступающего в забой выработки, при различных диаметрах трубопровода и типах вентиляторов.

Аналогично жесткому трубопроводу модель (7.9) позволяет определить и ряд других параметров. Так, расход воздуха, который будет подавать данный вентилятор по данному трубопроводу на заданную длину.

$$Q_2 = \sqrt{\frac{nb_2}{R_y \rho^2 + nb_2 \rho^2}}. \quad (7.13)$$

Необходимое число последовательно установленных вентиляторов одного типа-размера

$$n = \frac{R_y \rho^2 Q_2^2}{b_0 - b_2 \rho^2 Q_2^2}. \quad (7.14)$$

Необходимый диаметр трубопровода типа «М» для подачи с помощью заданного вентилятора заданного расхода воздуха на заданную длину определяется из формулы (7.9). Определяется

$$R_y = \frac{n(b_0 - b_2 \rho^2 Q_2^2)}{\rho^2 Q_2^2}. \quad (7.15)$$

По найденному значению R_y и заданной длине трубопровода определяется необходимый диаметр d_{tr} как ближайший больший.

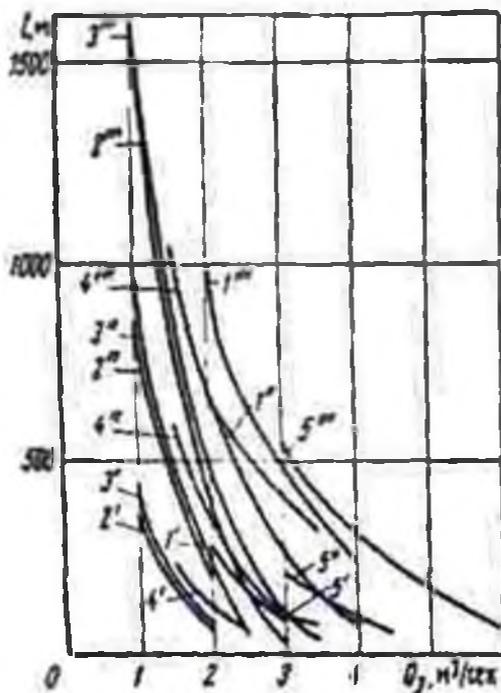


Рис. 7.2. График зависимости максимально возможной длины гибкого трубопровода от расхода воздуха, поступающего в забой:

1', 1'', 1''' — вентилятор «Проходня» 100-2мм, 2', 2'', 2''' — вентилятор ВМ11-6; 4', 5', 6' — вентилятор ВМ11-6 (для каждого вентилятора приняты диаметры трубопровода 400, 500 и 600 мм)

Суммарная характеристика вентиляторов при параллельной работе строится путем суммирования абсцисс индивидуальных характеристик

$$Q' = n_1 \sqrt{\frac{b_0 - h}{b_2}} \quad (7.16)$$

где Q' — расход воздуха параллельно работающих вентиляторов, м³/с;

n_1 — число параллельно работающих вентиляторов.

Формула (7.16) позволяет определить расход воздуха, который могут подать в забой параллельно работающие вентиляторы: при жестком трубопроводе

$$Q_0 = \sqrt{\frac{n_1^2 b_0}{\rho^2 b_2 + R \rho n_1^2}} \quad (7.17)$$

при гибком трубопроводе

$$Q_0 = \sqrt{\frac{n_1^2 b_0}{\rho^2 b_2 + R \rho^2 n_1^2}} \quad (7.18)$$

Необходимый диаметр для жесткого трубопровода при параллельной работе вентиляторов определяется из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} d_{тр} &= \left(\frac{6,5 n_1^2 \rho Q_0^2}{n_1^2 b_0 - b_2 \rho^2 Q_0^2} \right)^{0,2}; \\ \rho &= \left(\frac{1}{3} k_7 \frac{l}{m} d_{тр} \sqrt{R} + 1 \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

Для гибкого трубопровода

$$R_y = \frac{n_1^2 b_0 - \rho^2 b_2 Q_0^2}{n_1^2 \rho^2 Q_0^2} \quad (7.20)$$

Максимальная длина трубопровода, на которую n_1 параллельно установленных вентиляторов может подать заданный расход воздуха, определяется, как и при последовательной установке, из уравнений (7.3) и (7.12), однако значения коэффициентов будут другими.

Для уравнения (7.3) при жестком трубопроводе и параллельной работе вентиляторов:

$$A = \frac{25}{36} b_1^4;$$

$$B = \frac{5}{6} n_1 r^2 + \frac{5}{9} b_2 r^2.$$

$$C = \frac{n_1 r l}{3} + \frac{b_2^3 n_2}{9} + \frac{5}{3} b_2^2 n_1;$$

$$D = n_1 r + \frac{2}{3} n_1 b_2 l;$$

$$E = b_2 - \frac{n_1^2 b_0}{Q_2^2}.$$

Для уравнения (7.12) при гибком трубопроводе и параллельной работе вентиляторов:

$$F = 2,5 \cdot 10^{-3} n_1^2 f_1 c;$$

$$K = 2,5 \cdot 10^{-3} (n_1^2 f_1 d + b_2) + 1,04 \cdot 10^{-3} n_1^2 f_1 c;$$

$$M = 1,04 \cdot 10^3 (n_1^2 f_1 d + b_2) + 1,0816 n_1^2 f_1 c;$$

$$N = 1,0816 (n_1^2 f_1 d + b_2) - \frac{n_1^2 b_0}{Q_2^2}.$$

Проведенные аналитические исследования позволяют определить критерий выгодности перехода от параллельного включения двух вентиляторов к последовательному.

Для жесткого трубопровода этот критерий определяется из формул (7.5) и (7.17)

$$R = \frac{3}{2} b_2 p. \quad (7.21)$$

Для гибкого трубопровода этот критерий определяется из формул (7.13) и (7.18).

$$R_7 = \frac{3}{2} b_1. \quad (7.22)$$

Для вентилятора выгодно включать последовательно с жестким трубопроводом, если $R > \frac{3}{2} b_2 p$ и параллельно, если $R < \frac{3}{2} b_2 p$.

Для вентилятора выгодно включать последовательно с гибким трубопроводом, если $R_7 > \frac{3}{2} b_2$, параллельно, если $R_7 < \frac{3}{2} b_2$.

7.2 УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРИ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТРУБОПРОВОДЕ

В настоящее время величина утечек воздуха в трубопроводе местного проветривания, производительность вентилятора и депрессия трубопровода определяются приближенно. В связи с воз-

возможностью выполнения вычислений на ЭВМ указанные величины для жесткого трубопровода могут определяться с большей точностью.

Депрессия трубопровода (без учета скоростного напора на выходе трубопровода) будет

$$h_r = R_1 \sum_{i=1}^n Q_i^2 \quad (7.23)$$

где Q_i — расход воздуха через i -е звено трубопровода, м³/с;
 R_1 — аэродинамическое сопротивление звена трубопровода, кгс·с²/м⁴,

n — число звеньев в трубопроводе.

Расходы воздуха Q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и производительность вентиляторов $Q_{n+1} = Q_n$ определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned} R_1 Q_1^2 &= R_m (Q_2 - Q_1)^2; \\ R_1 Q_1^2 + R_m (Q_2 - Q_1)^2 &= R_m (Q_2 - Q_2)^2; \end{aligned} \quad (7.24)$$

$$R_2 Q_2^2 + R_m (Q_2 - Q_{n-1})^2 = R_m (Q_{n+1} - Q_2)^2.$$

где $Q_2 = Q_n$ — расход воздуха, поступающего в забой (на выходе из трубопровода), м³/с;

R_m — аэродинамическое сопротивление путей утечек воздуха в месте соединений двух звеньев, кгс·с²/м⁴.

Все уравнения системы (7.24) могут решаться последовательно. Первое уравнение решается относительно Q_1 . Значение Q_1 находится по известной методике определения расхода воздуха для проветривания забоя тупиковой выработки. Зная Q_1 и предварительно определив Q_2 , из второго уравнения можно определить Q_2 , и т. д.

Из k -го уравнения определяется

$$Q_{k+1} = \frac{R_m Q_k \pm \sqrt{R_m Q_k^2 - R_m [Q_k^2 (R_m - R_1) - R_m (Q_k - Q_{k-1})^2]}}{R_m} \quad (7.25)$$

Производительность вентилятора Q_{n+1} определяется из последнего уравнения системы (7.24). Утечки воздуха в трубопроводе равны $Q_{y,r} = Q_{n+1} - Q_1$, а коэффициент утечек $\rho = \frac{Q_{n+1}}{Q_1}$.

Значение R_m может определяться экспериментально.

Воспользовавшись формулой [12]

$$k_y = \frac{8Q}{nd_{y,r} \sqrt{h}} \quad (7.26)$$

можно определить значение R_m :

$$R_m = \left(\frac{8}{nd_{y,r} k_y} \right)^2 \quad (7.27)$$

Для определения расхода воздуха, который будет поступать в любой выработки, Q_1 при заданном вентиляторе рассмотрим ряд уравнений, из которых определяются утечки воздуха через 1, 2, ..., n -й стык между звеньями трубопроводов $Q_{y1}, Q_{y2}, \dots, Q_{yn}$.

Для первого звена

$$R_1 Q_1^2 = R_m Q_{y1}^2; \quad Q_{y1} = a_1 Q_1, \quad (7.28)$$

где

$$a_1 = \sqrt{\frac{R_1}{R_m}}.$$

Для второго звена

$$R_m Q_{y2}^2 = R_2 Q_2^2 + R_m Q_{y1}^2; \quad Q_{y2} = a_2 Q_1, \quad (7.29)$$

где

$$a_2 = \sqrt{a_1^2 (1 + a_1)^2 + a_2^2};$$

$$Q_2 = Q_1 + Q_{y1}.$$

Для третьего звена

$$R_m Q_{y3}^2 = R_3 Q_3^2 + R_m Q_{y2}^2; \quad Q_{y3} = a_3 Q_1, \quad (7.30)$$

где

$$a_3 = \sqrt{a_1^2 (1 + a_1 + a_2)^2 + a_3^2};$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_{y1} + Q_{y2}.$$

Для n -го звена

$$Q_{yn} = Q_1 \sqrt{a_1^2 \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} a_i\right)^2 + a_n^2}, \quad (7.31)$$

где

$$a_k = \sqrt{a_1^2 \left(1 + \sum_{i=1}^{k-1} a_i\right)^2 + a_k^2};$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1.$$

Уравнение, описывающее вентиляционную систему, запишется в виде

$$b_2 - b_1 Q_1^2 \left[1 + a_1 + \sum_{i=2}^{n-1} \left(\sqrt{a_1^2 \left(1 + \sum_{j=1}^{i-1} a_j\right)^2 + a_i^2} \right) \right]^2 =$$

$$= R_m Q_1^2 \left[a_1^2 \left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} a_i\right)^2 + a_n^2 \right], \quad (7.32)$$

где $b_0; b_1$ — коэффициенты эмпирической формулы, описывающей характеристику вентилятора.

Из уравнения (7.32) определяется значение Q_1 .

7.3. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ РАССРЕДОТОЧЕННОЙ УСТАНОВКЕ ВЕНТИЛЯТОРОВ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

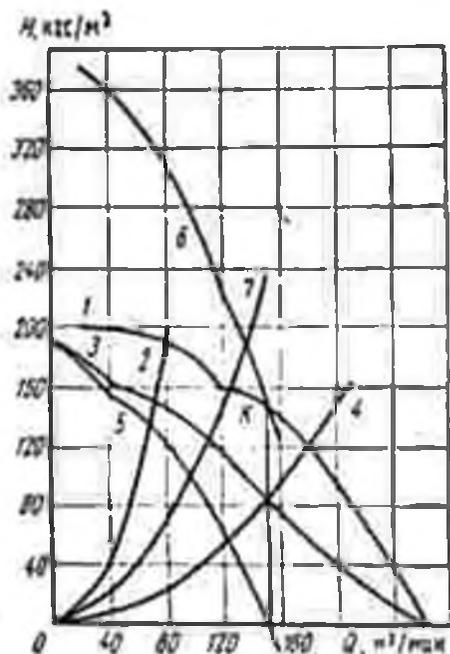
Метод предварительного упрощения вентиляционных систем позволяет производить аналитический расчет вентиляционных систем местного проветривания при рассредоточенной установке вентиляторов. Рассмотрим работу двух вентиляторов на трубо-



Рис. 7.3. Схема вентиляционной системы с рассредоточенной установкой двух вентиляторов местного проветривания

Рис. 7.4. Графическое определение места второго вентилятора при рассредоточенной установке:

1 — характеристика вентилятора; 2 — характеристика путей утечки воздуха в трубопроводе на участке АБ — $H_{\text{ус}}$; 3 — преобразованная характеристика вентилятора после исчисления характеристик путей утечки воздуха аналогично по абсциссам; 4 — характеристика трубопровода на участке АБ с сопротивлением $H_{\text{д.п.}}$; 5 — характеристика вентилятора, приведенного в точку Л с соответствующим трубопроводом длиной АВ вычитаемым по ординатам; 6 — суммарная характеристика двух последовательно работающих вентиляторов 1 и 2, приведенной в точку Л (суммирование по ординатам); 7 — характеристика трубопровода на участке от вентилятора 1 до выхода из трубопровода длиной l



провод. Определим место установки второго вентилятора по длине трубопровода, обеспечивающее отсутствие разрежения на участке трубопровода, прилегающем ко второму вентилятору со стороны первого, т. е. отсутствие подсоса загазованного воздуха в трубопровод, а для гибкого трубопровода — еще и отсутствие пережатия трубопровода.

Схема вентиляционной системы с рассредоточенной установкой двух вентиляторов приведена на рис. 7.3. После того как вентилятор 1 при длине трубопровода l перестает обеспечивать подачу необходимого расхода воздуха в забой, устанавливается на трубопровод вентилятор 2. При рассредоточенном расположении

вентилятор 2 должен устанавливаться не в конце трубопровода, а на расстоянии l от него. Нашей задачей является определение величины l . Для приведения вентилятора 1 в точку B трубопровод на участке $L-l$ можно условно рассматривать как параллельное соединение двух трубопроводов, по одному из которых расход воздуха равен расходу в конце участка (для вентиляционной системы на рис. 7.3 расход воздуха в точке B будет Q_B), по другому — расход равен величине утечек воздуха в трубопроводе на участке $AB - Q_{y1}$.

Следовательно, расход воздуха в точке A равен $Q_A = Q_B + Q_{y1}$. Аэродинамическое сопротивление условного трубопровода — $R_1 \rho_1$ (где R_1 — аэродинамическое сопротивление плотного трубопровода на участке AB , ρ_1 — коэффициент утечек воздуха в трубопроводе на участке), второго условного трубопровода (пути утечек воздуха в трубопроводе) — R_{yc} . Это позволяет рассмотреть графическое решение задачи, представленное на рис. 7.4. При графическом решении примем вентиляторы 1 и 2 одного типа. Задача решается путем исключения параллельного трубопровода, под которым мы понимаем пути утечек воздуха в трубопроводе, и перемещения вентилятора в точку B с исключением последовательного трубопровода, под которым мы понимаем трубопровод с сопротивлением $R_1 \rho_1$. Затем находится суммарная характеристика двух последовательно установленных вентиляторов: вентилятора 2 и вентилятора 1, приведенного в точку B . Запишем уравнение кривой 3

$$Q_{np} = \sqrt{\frac{b_{41} - h}{b_{21}}} - \sqrt{\frac{h}{R_{yc}}}, \quad (7.33)$$

где b_{41} , b_{21} — постоянные коэффициенты в эмпирической формуле, описывающей характеристику вентилятора 1 ($h = b_{41} - b_{21} Q^2$).

Чтобы перейти к кривой 5, необходимо от ординат кривой 3 вычесть ординаты кривой 4. Для жесткого (металлического) трубопровода

$$h_{np} = h - R_1 \rho_1 Q_{np}^2. \quad (7.34)$$

Подставим в уравнение (7.33) значение h из (7.34)

$$Q_{np} = \sqrt{\frac{b_{41} - h_{np} - R_1 \rho_1 Q_{np}^2}{b_{21}}} - \sqrt{\frac{h_{np} + R_1 \rho_1 Q_{np}^2}{R_{yc}}}. \quad (7.35)$$

Положив $h_{np} = 0$, найдем абсциссу точки K

$$Q_K = \sqrt{\frac{b_{41} - R_1 \rho_1 Q_K^2}{b_{21}}} - \sqrt{\frac{R_1 \rho_1 Q_K^2}{R_{yc}}}. \quad (7.36)$$

Для определения R_{yx} будем исходить из равенства депрессии участка трубопровода с сопротивлением $R_1 \rho_1$ и путей утечек воздуха

$$R_1 \rho_1 Q_B^2 = R_{yx} Q_{y1}^2. \quad (7.37)$$

Так как производительность вентилятора 1 будет

$$Q_A = Q_B + Q_{y1} = \rho_1 Q_B. \quad (7.38)$$

то

$$R_{yx} = \frac{R_1 \rho_1}{(\rho_1 + 1)^2}. \quad (7.39)$$

Подставив R_{yx} согласно (7.39) в формулу (7.36) и произведя преобразования, получим

$$Q_K^2 = \frac{b_{01}}{\rho_1 l_{21} + R_1 \rho_1}. \quad (7.40)$$

Производительность приведенного в точку В вентилятора 1 — Q_A равна производительности вентилятора 2 — Q_{02} , т. е. $Q_B = Q_{02}$. Если принять $Q_{02} = Q_K$, то можно записать уравнение

$$\frac{R_2 Q_K^2}{\rho_2} = b_{02} - b_{22} Q_K^2. \quad (7.41)$$

где R_2 — аэродинамическое сопротивление плотного трубопровода на участке ВС, кгс · с²/м⁶;

ρ_2 — коэффициент утечек воздуха на этом участке;

b_{02} , b_{22} — постоянные коэффициенты эмпирической формулы, описывающей характеристику вентилятора 2.

Подставив в уравнение (7.40) Q_K , найденное из (7.41), получим

$$\frac{b_{02} \rho_1}{R_2 + b_{22} \rho_1} = \frac{b_{01}}{\rho_1^2 b_{21} + R_1 \rho_1}. \quad (7.42)$$

Соотношение (7.42) позволяет определить расстояние места установки вентилятора 2 от конца трубопровода. При жестком (металлическом) трубопроводе зависимость коэффициента утечек воздуха от длины, согласно формуле (7.2), может быть записана в виде

$$\rho = 1 + u_1 l + u_2 l^2, \quad (7.43)$$

где

$$u_1 = \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{r k^2}{2}}; \quad u_2 = \frac{5}{6} \sqrt[3]{\left(\frac{r k^2}{2}\right)^2}.$$

Подставив в уравнение (7.42) p согласно (7.43) и $R_0 = r_1 l$, получим уравнение 6-й степени относительно

$$A_4 l^6 + A_3 l^5 + A_2 l^4 + A_1 l^3 + A_0 l^2 + A_1 l + A_0 = 0; \quad (7.44)$$

где:

$$A_4 = b_{02} u_{22} A_{11}; \quad A_3 = b_{02} u_{12} A_{11} - b_{02} u_{22} A_{21};$$

$$A_2 = b_{02} A_{11} - b_{02} u_{12} A_{21} + b_{02} u_{22} A_{21};$$

$$A_1 = b_{02} u_{12} A_{21} - b_{02} A_{21} - b_{02} u_{22} A_{11};$$

$$A_0 = b_{02} A_{11} - b_{02} u_{12} A_{21} + b_{02} u_{22} A_{01} - b_{01} b_{22} u_{22};$$

$$A_1 = b_{02} u_{12} A_{11} - b_{02} A_{11} - b_{01} r_2 - b_{01} b_{22} u_{12};$$

$$A_0 = b_{02} A_{01} - b_{01} b_{22};$$

$$A_{21} = b_{21} u_{21}^2; \quad A_{21} = 4b_{21} u_{21}^2 L + 2b_{21} u_{11} u_{21} + r_1 u_{21};$$

$$A_{21} = b_{21} u_{11}^2 + 6b_{21} u_{21}^2 L^2 + 2b_{21} u_{21} + 2b_{21} u_{11} u_{21} L + 4b_{21} u_{11} u_{21} L + r_1 u_{21} L + r_1 u_{11} + 2r_1 u_{21} L;$$

$$A_{11} = 2b_{21} u_{11}^2 L + 4b_{21} u_{21}^2 L^2 + 2b_{21} u_{11} + 4b_{21} u_{21} L + 6b_{21} u_{11} u_{21} L^2 + 2r_1 u_{21} L^2 + r_1 + 2r_1 u_{11} L + r_1 u_{21} L^2;$$

$$A_{01} = b_{21} + 2b_{21} u_{11} L + b_{21} u_{11}^2 L + 2b_{21} u_{21} L^2 + 2b_{21} u_{11} u_{21} L^2 + b_{21} u_{21}^2 L^2 + r_1 L + r_1 u_{11} L^2 + r_1 u_{21} L^2.$$

где u_{11} , u_{21} — коэффициенты в формуле (7.34) для трубопровода на участке AB ;

u_{12} , u_{22} — то же, для трубопровода на участке BC .

Уравнение (7.44) может решаться одним из приближенных методов, в частности методом Ньютона.

Формула (7.34) для гибкого (типа «М») трубопровода

$$h_{\text{гп}} = h - R_i \rho_1^2 Q_K^2 \quad (7.45)$$

где R_i — аэродинамическое сопротивление гибкого трубопровода на участке AB с учетом утечек воздуха, кгс $\text{с}^2/\text{м}^6$.

Аэродинамическое сопротивление условного трубопровода

$$R_{\text{гп}} = \frac{R_i \rho_1^2}{(\rho_1 - 1)^2} \quad (7.46)$$

Формула (7.40) для гибкого трубопровода

$$Q_K^2 = \frac{b_{01} - R_i \rho_1^2 Q_K^2}{\rho_1 b_{21}}, \quad (7.47)$$

а уравнение (7.41) можно записать в виде

$$R_i Q_K^2 = b_{01} - b_{21} Q_K^2 \quad (7.48)$$

Тогда уравнение (7.42) для гибкого трубопровода запишется

$$\frac{b_{02}}{R_2 + b_{22}} = \frac{b_{01}}{R_1^2 (R_1 + b_{11})} \quad (7.49)$$

Зависимости между коэффициентом утечек воздуха ρ и длиной трубопровода l , между аэродинамическим сопротивлением (с учетом утечек воздуха) R' и длиной трубопровода даются формулами (7.10) и (7.11). Подставив в уравнение (7.49) значения ρ , R_1 , R_2 , получим уравнение 3-й степени

$$-A_2 \rho^3 + A_1 \rho^2 - A_0 l + A_3 = 0, \quad (7.50)$$

где

$$A_2 = 2.5 \cdot 10^{-7} b_{02} / c,$$

$$A_1 = 2.5 \cdot 10^{-7} b_{02} [(d + cl) + b_{21}] + (5 \cdot 10^{-7} b_{02} L + 1.04 \cdot 10^{-9} b_{02}) / c,$$

$$A_0 = (5 \cdot 10^{-7} b_{02} L + 1.04 \cdot 10^{-9} b_{02}) [(d + cl) + b_{11}] + \\ + (1.0816 b_{02} + 1.04 \cdot 10^{-9} b_{02} L + 2.5 \cdot 10^{-7} b_{02} L^2 + b_{11}) / c,$$

$$A_3 = (1.0816 b_{02} + 1.04 \cdot 10^{-9} b_{02} L + 2.5 \cdot 10^{-7} b_{02} L^2) [(d + cl) + b_{11}] - \\ - b_{01} / d - b_{01} b_{21}.$$

Уравнение (7.50) может решаться методом Ньютона.

Второй вентилятор при рассредоточенной установке должен находиться от конца трубопровода на расстоянии не меньшем определяемого из уравнений (7.44) или (7.50).

Разработанный метод позволяет рассчитать параметры совместной работы двух вентиляторов на трубопроводе. При расчете параметров расстояние между двумя вентиляторами на трубопроводе принимается $L_1 = L - l = \text{const}$ (рис. 7.3).

Вентилятор l приводится в точку B двумя трансформациями координат точек, выбранных на характеристике вентилятора l , $M_{011} (Q_{011}; h_{011})$. Первая трансформация исключает утечки воздуха на участке трубопровода AB . Определяются координаты точек $M_{A1} (Q_{A1}; h_{A1})$:

$$Q_{A1} = Q_{011} - \sqrt{\frac{h_{011}}{R_{\text{тл}AB}}} \quad (7.51)$$

Вторая трансформация исключает трубопровод на участке AB с сопротивлением R_{AB} и коэффициентом утечек ρ_{AB} . Определяются координаты точек $M_{B1} (Q_{B1}; h_{B1})$ при жестком трубопроводе

$$h_{B1} = h_{011} - R_{AB} \rho_{AB} Q_{A1}^2. \quad (7.52)$$

Для гибкого трубопровода вместо R, ρ , необходимо принимать $R_i \rho_i^2$.

Затем находятся координаты точек суммарной характеристики двух вентиляторов при последовательной установке: вентилятора 2 и вентилятора 1, приведенного в точку B .

Точки суммарной характеристики $M_{\Sigma B_1} (Q_{\Sigma B_1}, h_{\Sigma B_1})$

$$\begin{aligned} h_{\Sigma B_1} &= h_{B_1} - h_{B_0 i}; \\ Q_{\Sigma B_1} &= Q_{A_1}. \end{aligned} \quad (7.53)$$

где h_{B_1} — ординаты точек характеристики приведенного в точку В трубопровода вентилятора 1, найденные линейным интерполированием по расходам воздуха, являющимся абсциссами точек на характеристике вентилятора 2.

Суммарная характеристика описывается обычно аппроксимирующим полиномом второй степени.

Математическая модель вентиляционной системы с жестким трубопроводом запишется в виде

$$R_{1p} Q_2^2 = \beta_0 + \beta_1 p_2 Q_2 + \beta_2 p_2^2 Q_2^2, \quad (7.54)$$

где R_{1p} — относятся к участку трубопровода BC длиной l ;

Q_2 — расход воздуха, поступающего в забой, м³/с.

Из (7.54) можно определить расход воздуха, поступающего в забой Q_2 при фиксированной длине трубопровода. Из (7.54) можно определить максимальную длину трубопровода l , на которую два вентилятора при рассредоточенной установке с фиксированным расстоянием между ними могут обеспечить заданный расход воздуха в забой.

Эта длина определяется из уравнения 4-й степени

$$A_4 l^4 + A_3 l^3 + A_2 l^2 + A_1 l + A_0 = 0, \quad (7.55)$$

где

$$A_4 = -\beta_2 u_{22}^2 Q_2^2; \quad A_3 = (r_2 - 2\beta_2 u_{12}) u_{22} Q_2^2;$$

$$A_2 = (r_2 u_{12} Q_2 - \beta_1 u_{22} - \beta_2 u_{12}^2 Q_2 - 2\beta_2 u_{22} Q_2) Q_2;$$

$$A_1 = (r_2 Q_2 - \beta_1 u_{12} - 2\beta_2 u_{12} Q_2) Q_2; \quad A_0 = -\beta_0 - \beta_1 Q_2 - \beta_2 Q_2^2.$$

Математическая модель вентиляционной системы с гибким трубопроводом будет

$$R_2^* Q_2^2 = \beta_0 + \beta_1 p_2 Q_2 + \beta_2 p_2^2 Q_2^2, \quad (7.56)$$

где R_2^* — аэродинамическое сопротивление трубопровода на участке BC с учетом утечек воздуха, кгс·с²/м⁴.

Из (7.56) можно определить расход воздуха, поступающего в забой, Q_2 при фиксированной длине трубопровода. Уравнение (7.56) может быть приведено к уравнению 5-й степени, позволяющему определить максимальную длину трубопровода, на которую подается заданный расход воздуха.

$$A_5 l^5 + A_4 l^4 + A_3 l^3 + A_2 l^2 + A_1 l + A_0 = 0, \quad (7.57)$$

где

$$\begin{aligned}
 A_1 &= |cu_{20}^2 Q_1^2, & A_4 &= [(d - \beta_1) u_{20} + |cu_{11}| u_{20} Q_1^2; \\
 A_2 &= [2(d - \beta_1) u_{12} u_{20} + |c(u_{12}^2 + 2u_{20})| Q_1^2; \\
 A_3 &= [(d + \beta_1) (u_{12}^2 + 2u_{20}) Q_1 - 2|cQ_1 - \beta_1 u_{12}| Q_1; \\
 A_4 &= [2(d - \beta_1) u_{12} Q_1 + |cQ_1 - \beta_1 u_{12}| Q_1; \\
 A_5 &= (d - \beta_1) Q_1^2 - \beta_1 Q_1 - \beta_0.
 \end{aligned}$$

Рассмотрим работу трех и более вентиляторов при рассредоточенной установке на трубопроводе.

Для определения места установки последнего вентилятора все вентиляторы (кроме последнего) приводятся в место установки предпоследнего вентилятора. Порядок дальнейшего

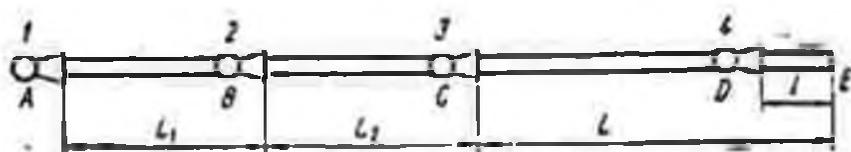


Рис. 7.5. Схема вентиляционной системы с рассредоточенной установкой четырех вентиляторов местного проветривания

решения задачи такой же, как и при работе двух вентиляторов на трубопровод. Рассмотрим более подробно решение задачи при работе на трубопровод четырех вентиляторов (рис. 7.5).

Расстояния L_1 и L_2 фиксированы. Это позволяет легко по упомянутой выше методике привести вентилятор 1 в точку В, найти суммарную характеристику вентилятора 2 и вентилятора 1, приведенного в точку В. Затем условный вентилятор с указанной суммарной характеристикой приводится в точку С и находится суммарная характеристика трех вентиляторов: вентилятора 3 и вентиляторов 1 и 2, приведенных в точку С. Суммарная характеристика вентиляторов, приведенных в точку расположения предпоследнего вентилятора, т. е. в точку С, описывается с достаточной точностью полиномом второй степени. Дальнейший порядок определения места расположения последнего вентилятора отличается от порядка для двух вентиляторов видом уравнения, описывающего суммарную характеристику вентиляторов.

Графическое решение на рис. 7.4 относится также к рассматриваемому случаю, если считать кривую 1 — суммарной характеристикой вентиляторов 1, 2, и 3 (вентиляторы 1 и 2 после приведения в точку С). Для того чтобы перейти к кривой 3, необходимо вычесть из абсцисс кривой 1 абсциссы кривой 2, т. е.

$$Q_{\text{оп}} = Q - \sqrt{\frac{h}{R_{\text{гн}}}} \quad (7.58)$$

Подставим в уравнение (4.17) значения Q из (7.58):

$$h = \beta_0 + \beta_1 \left(Q_{\text{оп}} + \sqrt{\frac{h}{R_{\text{гс}}}} \right) + \beta_2 \left(Q_{\text{оп}} + \sqrt{\frac{h}{R_{\text{гс}}}} \right)^2 \quad (7.59)$$

Для того чтобы перейти к кривой 5, необходимо от ординат кривой 3 вычесть ординаты кривой 4. Для жесткого трубопровода

$$h_{\text{оп}} = h - R_1 \rho_1 Q_{\text{оп}}^2 \quad (7.60)$$

Подставим в уравнение (7.59) значение h из (7.60):

$$h_{\text{оп}} + R_1 \rho_1 Q_{\text{оп}}^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(Q_{\text{оп}} + \sqrt{\frac{h_{\text{оп}} + R_1 \rho_1 Q_{\text{оп}}^2}{R_{\text{гс}}}} \right) + \beta_2 \left(Q_{\text{оп}} + \sqrt{\frac{h_{\text{оп}} + R_1 \rho_1 Q_{\text{оп}}^2}{R_{\text{гс}}}} \right)^2 \quad (7.61)$$

Чтобы найти абсциссу точки K , положим $h_{\text{оп}} = 0$. Подставим значение $R_{\text{гс}}$ согласно (7.39), получим

$$(\beta_2 \rho_1^2 - R_1 \rho_1) Q_K^2 + \beta_1 \rho_1 Q_K + \beta_0 = 0 \quad (7.62)$$

Подставив значение Q_K из (7.41) и заменив R_1 , R_2 , ρ_1 , ρ_2 выражениями через l , получим уравнение

$$\begin{aligned} & (\beta_2 l^2 + u_{22}(L - l) + u_{23}(L - l)^2 - r_1 l^2 + u_{22}(L - l) + \\ & + u_{23}(L - l)^2) \frac{b_{22} l + a_{22} l^2 + u_{22} l^3}{r_1 l^2 + b_{22} l + u_{22} l^2 + u_{23} l^3} + \beta_1 (l + u_{11}(L - l) + \\ & + u_{12}(L - l)^2) \sqrt{\frac{b_{22} l + a_{22} l^2 + u_{22} l^3}{r_1 l^2 + b_{22} l + u_{22} l^2 + u_{23} l^3}} + \beta_0 = 0 \end{aligned} \quad (7.63)$$

Это уравнение можно привести к уравнению 8-й степени и решать методом Ньютона или после соответствующего преобразования методом итерации.

Для гибкого трубопровода с учетом (7.45) и (7.46) уравнение (7.62) получим в виде

$$(\beta_2 - R_i) \rho_i^2 Q_K^2 + \beta_1 \rho_i Q_K + \beta_0 = 0 \quad (7.64)$$

Подставив значение Q_K из (7.48) и заменив R_i , R'_i , ρ_i выражениями через l , получим уравнение

$$\begin{aligned} & \beta_2 [1.04 + 5 \cdot 10^{-4} (L - l)] \sqrt{\frac{b_{22}}{1 + c(L - l) + d_{22}}} = \\ & = U [d + c(L - l) - \beta_2] \times \\ & \times [1.04 + 5 \cdot 10^{-4} (L - l)] \frac{b_{22}}{1 + c(L - l) + d_{22}} - \beta_0 \end{aligned} \quad (7.65)$$

Уравнение (7.65) можно привести к уравнению 6-й степени и решать методом Ньютона или после преобразования методом итерации.

Параметры совместной работы на трубопровод трех и больше вентиляторов определяются по тем же формулам, что и для двух вентиляторов, при условии, что уравнение описывает суммарную характеристику всех вентиляторов, приведенных в точку расположения последнего вентилятора, т. е. для рис. 7.5 в точку D , сопротивление участка $DE - R_{DE}$, а коэффициент утечек на этом участке ρ_2 . Для случая на рис. 7.5, приняв начальные операции трансформации координат те же, что и для рис. 7.3, т. е. по выражениям (7.41), (7.42), (7.43) можно их продолжить. Следующая операция трансформации координат исключает утечки воздуха на участке BC .

Определяются координаты точек $M_{D1}(Q_{D1}, h_{zD1})$:

$$Q_{D1} = Q_{zD1} - \sqrt{\frac{h_{zD1}}{R_{yc BC}}} \quad (7.66)$$

Из суммарной характеристики исключается трубопровод на участке BC с сопротивлением R_{BC} (сопротивление плотного трубопровода) и коэффициентом утечек ρ_{BC} . Определяются координаты точек $M_{C1}(Q_{C1}, h_{C1})$:

$$h_{C1} = h_{zD1} - R_{BC} \rho_{BC} Q_{D1}^2 \quad (7.67)$$

Находятся координаты точек суммарной характеристики трех вентиляторов при последовательной установке вентилятора 3 и вентиляторов 1 и 2 после суммирования в точке B . Определяются координаты точек $M_{zC1}(Q_{zC1}, h_{zC1})$:

$$\begin{aligned} h_{zC1} &= h_{zD1} - h_{C1} \\ Q_{zC1} &= Q_{D1} \end{aligned} \quad (7.68)$$

Исключаются утечки на участке CD . Определяются координаты точек $M_{C1}(Q_{C1}, h_{C1})$:

$$Q_{C1} = Q_{zC1} - \sqrt{\frac{h_{zC1}}{R_{yc CD}}} \quad (7.69)$$

Исключается трубопровод на участке CD с сопротивлением R_{CD} и коэффициентом утечек ρ_{CD} . Определяются координаты точек $M_{D1}(Q_{D1}, h_{D1})$:

$$h_{D1} = h_{C1} - R_{CD} \rho_{CD} Q_{C1}^2 \quad (7.70)$$

Находятся координаты точек суммарной характеристики четырех вентиляторов при последовательной установке вентилятора 4 и вентиляторов 1, 2 и 3 после двойного суммирования их в точках B и C и приведения в точку D . Определяются координаты точек $M_{zD1}(Q_{zD1}, h_{zD1})$:

$$\begin{aligned} h_{zD1} &= h_{zD1} + h_{D1} \\ Q_{zD1} &= Q_{C1} \end{aligned} \quad (7.71)$$

По точкам $M_{\Sigma D_1}$ ($Q_{\Sigma D_1}$, $h_{\Sigma D_1}$) производится описание суммарной характеристики аппроксимирующим полиномом второй степени.

7.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ТРУБОПРОВОДА МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Рассмотрим решение задачи для трубопроводов постоянной и непрерывно изменяющейся длины. При определении оптимального диаметра учитываются стоимость амортизации трубопровода и стоимость электроэнергии на продвижение воздушной струи по трубопроводу. От диаметра трубопровода зависит расход материала для изготовления трубопровода, поэтому при решении задачи принимается не полная стоимость, а только часть ее, зависящая от расхода материала.

Рассмотрим прорезиненный трубопровод постоянной длины. Звенья прорезиненного трубопровода, наращиваемые по мере продвижения выработки, обычно заменяются впоследствии более длинными. При этом длина основных звеньев трубопровода кратна длине первоначально устанавливаемых звеньев.

Затраты на амортизацию звеньев трубопровода при проветривании штрека общей длиной L с опережением лавы на длину l_1 (длина трубопровода $l = l_1 + l_2 - l_3$, где l_2 — расстояние от места установки вентилятора до лавы, m ; l_3 — среднее расстояние от конца трубопровода до забоя штрека, m) будут

$$\begin{aligned} \frac{l}{l_1} (nk_2 + n'k_2) &= \frac{L}{vl_m} \left(\frac{l}{m} \pi d_r m k_m + \frac{m-m'}{m'} \pi d_r m' k_m \right) = \\ &= \frac{L \pi d_r k_m}{vl_m} \left(l + \frac{k-1}{k} m \right), \text{ руб.} \end{aligned} \quad (7.72)$$

- где $t = \frac{L}{v}$ — время проведения штрека на длину L ;
 v — скорость проведения штрека, м/мес;
 l_1 — срок службы трубопровода, мес. Срок службы для прорезиненных трубопроводов (типа «М») можно принимать в хороших условиях эксплуатации (выработки сухие) — 10—12 мес. в трудных условиях (мокрые выработки, вода агрессивная) — 6—8 мес;
 $n = \frac{l}{m}$ — число одновременно установленных длинных звеньев трубопровода;
 m — длина длинного звена трубопровода, м;
 $k_2 = \pi d_r m k_m$ — часть стоимости одного длинного звена трубопровода, зависящая от диаметра (связанная с расходом материалов), руб.;
- d_r — диаметр трубопровода, м;
 k_m — стоимость 1 м² материала трубопровода, руб.;

$n' = \frac{m - m'}{m}$ — число находящихся в работе коротких звеньев трубопровода;

$m' = \frac{m}{k}$ — длина короткого звена трубопровода;

k — число, показывающее, во сколько раз длинные звенья превышают по длине короткие;

$k'_1 = \pi d_{\text{тр}} m' k_w$ — указанная часть стоимости одного короткого звена, руб.

После обозначения

$$\frac{L n k_w}{v f_1} \left(l + \frac{k-1}{k} m \right) = C$$

стоимость амортизации трубопровода можно выразить как

$$C d_1 \quad (7.73)$$

При выражении стоимости амортизации принимается, что для проветривания постоянно используется n длинных звеньев длиной m и $(k - 1)$ коротких звеньев длиной m' . По достижении трубопроводом длины $l + \frac{m(k-1)}{k}$ вентилятор переносится на новое место.

Принимается, что короткие звенья трубопровода амортизируются вне зависимости от того, находятся они в составе трубопровода или в ожидании очереди навески.

Затраты на электроэнергию для продвижения воздушной струи по трубопроводу подсчитываются исходя из расхода на среднюю длину трубопровода, равную $l_{\text{ср}} = l + \frac{m}{2}$. Через вентилятор будет вполне определенный расход воздуха. Он зависит от сопротивления трубопровода, а значит, и его диаметра.

Для определения экономически выгодного диаметра трубопровода установим зависимость между расходуемой мощностью вентилятора и сопротивлением трубопровода.

Известно, что

$$h = R_1 Q_0^2 = R \psi Q_0^2 \quad (7.74)$$

где R — сопротивление плотного трубопровода, кгс·с²/м⁴;

h — депрессия вентилятора, кгс/м²;

R_1 — сопротивление неплотного трубопровода, кгс·с²/м⁴;

Q_0 — производительность вентилятора, м³/с;

ψ — коэффициент, показывающий степень уменьшения сопротивления трубопровода за счет утечек воздуха,

$$\psi = \frac{1}{p} \quad (7.75)$$

Для прорезиненного трубопровода значение p определяется по формуле (7.10).

Используя характеристики вентиляторов, можно найти для каждого сочетания депрессии и расхода воздуха, проходящего через вентилятор, соответствующие значения $R_y = \frac{h}{Q_v^2}$. Задаваясь

производительностью вентилятора, по характеристике вентилятора находим депрессию и подсчитываем сопротивление неплотного трубопровода. Получив ряд значений R_y , соответствующих заданным значениям Q_v , и зная изменение мощности вентилятора в зависимости от Q_v , можно построить кривую изменения мощности в зависимости от сопротивления неплотного трубопровода.

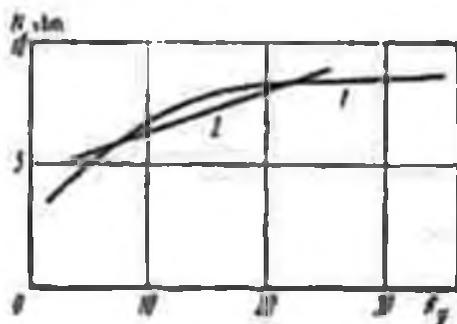


Рис. 7.6. График зависимости мощности вентилятора от аэродинамического сопротивления неплотного трубопровода: 1 — кривая мощности; 2 — прямая, аппроксимирующая зависимость

На рис. 7.6 для одного из вентиляторов построена кривая зависимости расходуемой мощности от сопротивления неплотного трубопровода (кривая 1).

Выразив с помощью эмпирической формулы мощность вентилятора через сопротивление неплотного трубопровода, можно определить величину расходуемой мощности вентилятора при работе на любое аэродинамическое сопротивление.

Для решения поставленной задачи кривую мощности с достаточной точностью можно аппроксимировать прямой (для упрощения решения задачи), уравнение которой будет иметь вид

$$N = aR_y + b, \quad (7.76)$$

где a , b — постоянные коэффициенты.

Затраты на электроэнергию, расходуемую вентилятором местного проветривания, подсчитываются по формуле

$$N_{24 \cdot 30ty} = (aR_y + b) 24 \cdot 30ty. \quad (7.77)$$

Выражение (7.77) можно записать

$$\frac{C_1}{Q_v^2} + C_2, \quad (7.78)$$

где

$$C_1 = \frac{1665,6 \eta_{\text{вент}} \eta_{\text{тр}} L \gamma}{\eta};$$

$$C_2 = \frac{730bL\gamma}{\eta}.$$

Суммарные затраты на амортизацию трубопровода и расход электроэнергии должны быть минимальными

$$f(d_1) = Cd_1 + \frac{C}{d_1^k} + C_1 \rightarrow \min. \quad (7.79)$$

Оптимальный диаметр определяется из уравнения

$$f'(d_1) = C - \frac{kC}{d_1^{k+1}} = 0 \quad (7.80)$$

Найденное из уравнения (7.80) значение $d_{1, \text{оп}}$ обеспечит минимальные суммарные затраты на амортизацию трубопровода и на электроэнергию

$$d_{1, \text{оп}} = \left(\frac{7429 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot C_1 \cdot \gamma^k}{k_n \left(1 + \frac{k-1}{k} m \right)} \right)^{0.167}. \quad (7.81)$$

Рассмотрим методику определения наилучшего диаметра трубопровода при проветривании непрерывно удлиняющейся выработки с помощью вентилятора местного проветривания.

Следует различать два случая: 1) звенья трубопровода в процессе установки не заменяются, например, металлический трубопровод; 2) трубопровод удлиняется путем установки коротких звеньев, которые в дальнейшем заменяются длинными, например, резинянный трубопровод.

В первом случае (для металлического трубопровода) затраты на износ и амортизацию звеньев определяются как сумма затрат на трубопровод для начального участка трубопровода и каждого последующего звена трубопровода

$$\begin{aligned} n_n k \frac{l_n}{v_1} + k \frac{l_n - l_1}{v_1} + k \frac{l_n - 2l_1}{v_1} + \dots + \\ + k \frac{l_n - ml_1}{v_1} = \frac{\pi d_1^k k_n l_1^k}{4 v_1} \left(l_1 + \frac{l_2 - m}{2} \right), \text{ руб.} \end{aligned} \quad (7.82)$$

где $n_n = \frac{l_1}{m}$ — число звеньев трубопровода, установленных в начальный период (в момент включения вентилятора),

l_1 — начальная длина трубопровода, м;

$l_n = \frac{l_1}{v}$ — время проведения выработки на длину l_1 , мес;

l_2 — длина наращиваемой части трубопровода, м;

$l_1 + l_2$ — полная максимальная длина трубопровода, м;

v_1 — скорость проведения выработки, м/мес;

$n = \frac{l_2}{m}$ — число звеньев трубопровода, наращиваемых при проведении выработки;

$l_2 = \frac{m}{v}$ — время между наращиваниями двух звеньев трубопровода, мес;

l_3 — срок службы трубопровода, мес.

Срок службы для металлического трубопровода в хороших условиях эксплуатации (выработки сухие) — 36 мес. в трудных условиях (выработки мокрые, вода агрессивная) — 24 мес.

Во втором случае, когда в процессе проветривания необходимо производить замену первоначально установленных коротких звеньев длинными (прорезиненный трубопровод), полные затраты на износ и амортизацию звеньев трубопровода будут

$$\frac{\pi d_1^2 k_m l_2}{4 \tau} \left(l_1 - m + \frac{l_2 + m}{2} \right), \text{ руб.} \quad (7.83)$$

Затраты на электроэнергию, расходуемую на продвижение воздуха по трубопроводу, определяются различно при регулировании расхода воздуха, поступающего в забой (которое иногда производится для уменьшения скорости движения воздуха в забое), и при отсутствии регулирования.

При регулировании расхода воздуха зависимость расхода электроэнергии от аэродинамического сопротивления трубопровода, обусловленного его диаметром, исчезает, так как всякое изменение сопротивления трубопровода компенсируется изменением сопротивления регулятора. Поэтому при регулировании расхода воздуха экономически выгодно иметь минимально необходимый диаметр трубопровода, так как чем меньше диаметр, тем меньше расходы на амортизацию трубопровода. В данном случае должен определяться не экономически выгодный, а минимально необходимый диаметр трубопровода, который обеспечит подачу необходимого расхода воздуха в забой при максимальной длине.

При отсутствии регулирования в забой первоначально поступает воздуха больше необходимого, а затем расход его уменьшается до заданной величины по мере увеличения сопротивления трубопровода, связанного с его удлинением.

Затраты на электроэнергию, расходуемую на проветривание выработки при изменяющейся длине трубопровода, можно подсчитать как сумму затрат для участков с длиной, отличающейся на фиксированную величину, для которой ψ изменяется в пределах принятой точности расчета, т. е. для участков длиной l_1 , $l_1 + \frac{l_2}{n}$, $l_1 + 2 \frac{l_2}{n}$, ..., $l_1 + l_2$ (n — число участков с постоянной длиной):

$$N_1 24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma + N_2 24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma + \dots + N_{n+1} 24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma, \quad (7.84)$$

где N_1, N_2, \dots, N_{n+1} — расходуемая мощность вентиляторов в начальный и последующие периоды, отличающиеся длиной трубопровода на величину $\frac{l_2}{n}$.

Сумму (7.84) можно привести к виду

$$24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma \{ (aR_{\gamma_1} + b) + (aR_{\gamma_2} + b) + \dots + (aR_{\gamma_{n+1}} + b) \} = 24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma b (n + 1) + 24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma a (R_{\gamma_1} + R_{\gamma_2} + \dots + R_{\gamma_{n+1}}) \quad (7.85)$$

Обозначим первое слагаемое суммы (7.85)

$$24 \cdot 30 \frac{\gamma b}{\sigma} \left(l_2 + \frac{l_2}{n} \right) = C_1. \quad (7.86)$$

Преобразуем второе слагаемое суммы (7.85) и обозначим

$$24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma a r \left(\frac{l_1}{\rho_1} + \frac{l_1 + \frac{l_2}{n}}{\rho_2} + \dots + \frac{l_1 + l_2}{\rho_{n+1}} \right) = 6,48 \cdot 24 \cdot 30 \frac{l_2}{\text{см}} \gamma a \frac{\sigma}{d_r^5} \times \left(\frac{l_1}{\rho_1} + \frac{l_1 + \frac{l_2}{n}}{\rho_2} + \dots + \frac{l_1 + l_2}{\rho_{n+1}} \right) = \frac{C_2}{d_r^5} \quad (7.87)$$

где $r = \frac{6,48\sigma}{d_r^5}$ — удельное аэродинамическое сопротивление трубопровода, кгс с²/м⁶;
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{n+1}$ — коэффициенты утечки воздуха в трубопроводе участков длиной соответственно $l_1, l_1 + \frac{l_2}{n}, \dots, l_1 + l_2$.

Обозначим затраты на трубопровод, выраженные формулами (7.82) и (7.83), Cd_r .

Затраты на электроэнергию

$$C_1 + \frac{C_2}{d_r^5} \quad (7.88)$$

Тогда функция затрат запишется

$$I(d_r) = Cd_r + C_1 + \frac{C_2}{d_r^5} \rightarrow \min. \quad (7.89)$$

Оптимальный диаметр определяется из уравнения

$$I'(d_r) = C - \frac{5C_2}{d_r^6} = 0. \quad (7.90)$$

Расчетная формула для оптимального диаметра будет

$$d_{r, \text{opt}} = \left(\frac{5C_2}{C} \right)^{0,167} \quad (7.91)$$

8. РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ РАСХОДА ВОЗДУХА В ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

8.1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЕГУЛЯТОРАМ РАСХОДА ВОЗДУХА

Распределение воздуха в шахтной вентиляционной сети может существенно отличаться от требуемого, в связи с чем для перераспределения его требуется производить соответствующее изменение (бразитроп самой сети или установку дополнительных энергетических источников, способствующих изменению воздуха в отдельных ветвях, артелях).

Все известные способы перераспределения воздуха в сети сводятся к следующим трем: отрицательное регулирование, положительное регулирование и комбинированное регулирование.

Отрицательное регулирование, получившее свое название из-за эффекта уменьшения подачи воздуха как в регулируемом направлении, так и по шахте в целом, неизбежно связано с увеличением сопротивления ветви (ветви), на которой произведена установка регулирующего органа, которым, как правило, в настоящее время является вентиляционное окно.

Положительное регулирование приводит к увеличению расхода воздуха как в регулируемом направлении, так и по шахте в целом.

Если для отрицательного регулирования характерно увеличение сопротивления ветви и сети в целом, то при положительном регулировании являющейся тенденцией уменьшения сопротивления нет. При положительном регулировании за счет перекрепления выработки новыми, более совершенными аэродинамическими видами крепи, увеличения сечения выработки, сокращения пути вентиляционной струи, проведении параллельной выработки действительно имеет место снижение аэродинамического сопротивления отдельных управляемых направлений и шахтной вентиляционной сети в целом. Однако при осуществлении регулирования за счет применения дополнительных энергетических источников перераспределения воздуха в сети обычно имеет место увеличение аэродинамического сопротивления регулируемых направлений и всей шахтной сети в целом, за исключением редких случаев установки толкачей, работающих без перемычки, когда внешнее или сопротивление пренебрежимо мало. Работа толкачей без перемычки имеет небольшое распространение и технически целесообразна лишь в ограниченных условиях; при установке

толкача с перемычкой вносимое в регулируемое направление аэродинамическое сопротивление включает сопротивление перемычки и сопротивление вентилятора.

Комбинированное регулирование, как об этом свидетельствует его название, является комбинацией двух предыдущих видов регулирования распределения воздуха в шахтной вентиляционной сети и применимо лишь по шахте, крылу или участку в целом, а не для отдельного направления.

Этот способ выгодно сочетает достоинства отрицательного и положительного регулирования и позволяет получить большую глубину регулирования.

Прежде чем перейти к рассмотрению средств регулирования, следует сделать следующие предварительные замечания.

В технике принято называть регулятором совокупность устройств, присоединяемых к регулируемому объекту для регулирования его выходной величины. Эта совокупность может содержать чувствительный (измерительный) элемент или задающее устройство, элемент сравнения, в ряде случаев усилительные и корректирующие элементы, а также исполнительный элемент. Указанный комплекс устройств может включать все перечисленные элементы (в этом случае речь идет об автоматическом регуляторе) или некоторые из них.

В практике рудничной вентиляции процессы контроля управляемой величины контроля расхода воздуха на участке, изменения ее и последующего контроля результатов регулирующего воздействия часто разнесены во времени на значительный период и осуществляются не связанными между собой средствами. Например, регулированию расхода воздуха на участке предшествуют замер анемометром (выполняющим в данном случае роль чувствительного элемента), сравнение полученной величины с требуемой (в данном случае человек выполняет функции элемента сравнения), установка вентиляционного окна, имеющего, как правило, фиксированное сопротивление, или изменение расхода вентилятора и последующий контроль результатов регулирования. Естественно, что данный вид регулирования, распавшись на отдельные, разделенные большим промежутком времени операции, привел к не вполне соответствующей терминологии, в соответствии с которой регуляторами расхода воздуха часто называют лишь регулирующий орган.

Весьма существенным фактором является то обстоятельство, что осуществляемое в настоящее время регулирование расхода воздуха не является оперативным, а следовательно, не может служить для перераспределения расхода воздуха по данному фактору. Например, весьма эффективные виды положительного регулирования с помощью перекрепления выработки аэродинамически совершенными видами крепи, расширения сечения, сокращения длины выработки, проведения параллельных выработок отпадают из-за огромной длительности их и никак не могут быть предусмотре-

трены в системе автоматического регулирования проветривания шахт, в том числе по газовому фактору.

При современном уровне контроля параметров рудничной атмосферы вполне оправданным является требование ПБ в угольных и сланцевых шахтах, запрещающее подземную установку вентиляторов-толкачей. Тем не менее, учитывая высокую экономичность, быстродействие данного способа регулирования, большую глубину регулирования следует отнести способ положительного регулирования с применением вентиляторов-толкачей к перспективным. Действующие ограничения ПБ в отношении вентиляторов-толкачей могут быть сняты при наличии соответствующей надежной аппаратуры автоматического контроля параметров рудничной атмосферы и схем телеавтоматического управления вентиляторами-толкачами.

Исходя из условий работы в шахтных условиях к исполнительным органам регулирования расхода воздуха в шахтной вентиляционной сети, могут быть предъявлены следующие основные технические требования:

- 1) обеспечение достаточной глубины регулирования;
- 2) минимальное загромождение сечения выработки, возможность прохода транспорта, движения людей;
- 3) унификация, возможность многократного воспроизведения характеристик и их однородность при выполнении различных модификаций применительно к габаритам выработок, возможность применения в выработках различной конфигурации;
- 4) стабильность характеристик регулирующего органа во времени, монотонность;
- 5) максимальная простота регулирующего органа и его привода;
- 6) плавность изменения регулируемой величины;
- 7) возможность автоматического или дистанционного управления.

Наряду с перечисленными выше, к регулирующему органу и его сервомотору должны быть предъявлены общие требования: минимальная масса и стоимость, искробезопасность, прочность, надежность в работе, малые эксплуатационные расходы, легкость установки, перемещения, возможность многократного использования, максимальная простота, безопасность обслуживания, а также отсутствие опасности для горнорабочих и транспортных машин при перемещении в зоне регулирующего органа в период его работы.

Создание надежных регулирующих органов для оперативного перераспределения расхода воздуха в шахтной вентиляционной сети по газовому фактору представляет собой сложную задачу, решению которой и конструктивной проработке многих вариантов регулирующих органов и их сервомоторов должны предшествовать выбор типа регулирующего органа и исследование его аэродинамических параметров.

В.2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЗМОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ РЕГУЛЯТОРОВ РАСХОДА ВОЗДУХА НА УЧАСТКЕ

На основании изложенных выше основных требований в качестве регулирующих органов регуляторов расхода воздуха в отдельных направлениях шахтной сети могут быть приняты следующие:

1. Регулирующий орган жалюзийного вида с профилем жалюзи типа крыла самолета (рис. 8.1) предназначается для установки на выработках с малым движением людей и транспорта, главным образом на кроссинах вентиляционного горизонта.

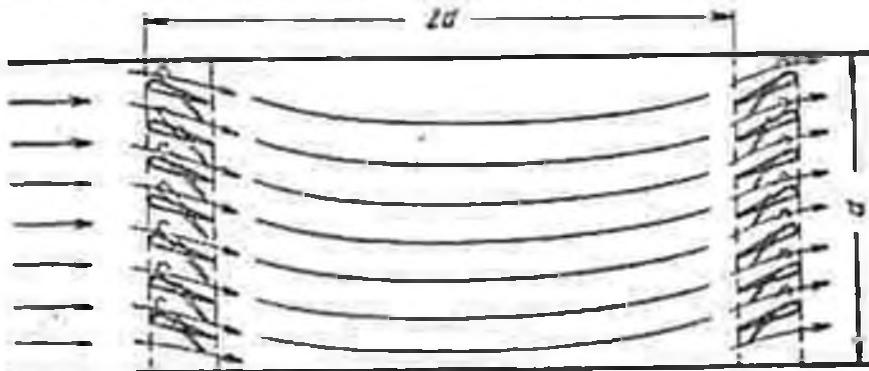


Рис. 8.1. Схема регулирующего органа жалюзийного типа



Рис. 8.2. Схема регулирующего органа типа «воздушный карман»

Для минимального влияния оседающей пыли предполагается установка его в вертикальном положении. Привод всех жалюзи — синхронный с фиксацией в любом положении при изменении угла установки лопаток жалюзи по отношению к нормали к площади установки регулятора в пределах от 0 до 80° .

Переменное по величине, в зависимости от угла поворота жалюзи, аэродинамическое сопротивление создается как за счет сужения живого сечения струи, так и за счет эффекта изменения направления ее движения, сильного завихрения и турбулентации.

2. Регулирующий орган вида «воздушный карман» (рис. 8.2) предназначается для монтажа на выработках вентиляционных горизонтов независимо от интенсивности движения, а также в виде исключения — на однопутевых выработках основных горизонтов

при небольшой интенсивности движения, так как предусматривает оставление в выработке центральной незагроможденной части для транспорта и прохода людей.

Поскольку получение достаточно широкого диапазона изменения аэродинамического сопротивления регулирующих органов регулятора отрицательного типа при больших остаточных площадях сечения затруднительно, предусматривается последовательная установка нескольких аналогичных секций.

Установка в выработке — вертикальная, привод секций — синхронный с фиксацией в любом промежуточном положении.

Эффект изменения аэродинамического сопротивления регулирующего органа достигается как за счет сужения живого сечения струи створками, так и за счет дополнительного поджатия ее в расхода части давления на завихрения и турбулизацию воздуха в «шармане».

При полностью открытых створках регулирующего органа сечение выработки практически не загромождено, а гладкая поверхность стенок створок компенсирует некоторое уменьшение сечения живого потока (на толщину створок), в связи с чем вносимое начальное аэродинамическое сопротивление минимально.

3 Регулирующий орган вида «воздушный лабиринт» (рис. 8.3) предназначен для установки на вентиляционных горизонтах взамен вентиляционных окон при сохранении одинакового диапазона изменения аэродинамического сопротивления.

Ограниченная длина хода каждого шибера должна обеспечить у стенки выработки незагроможденный проход для людей. Для повышения аэродинамического сопротивления регулирующего органа данного вида предусматривается смещенная (шахматная) установка приводов, в связи с чем должно быть достигнуто не только многократное дросселирование струи за счет попеременного сужения и расширения ее, но и создание многочисленных вихрей.

Для работы в шахтных условиях вариант жесткого шибера, уходившего в специальную углубление в выработке, нецелесообразен из-за большой трудоемкости сооружения его, а также сложности привода, в связи с чем предусматривается реализация шахтного регулирующего органа типа «воздушный лабиринт» в виде гибких шторок, изготовленных из дешевых материалов (пластики, отработанные конвейерные ленты, использованные прорезиненные трубы и др.), армированных в вертикальном направлении рейками для придания жесткости. Схема шахтного варианта регулирующего органа типа «воздушный лабиринт» приведена на рис. 8.4.

Как видно из схемы, жесткие шиберы заменены гибкими шторками, армированными продольными рейками и навешенными на приводные (они же натяжные) верхний и нижний тросы. Растяжка шторок осуществляется за счет жимков на тросах.

В качестве опор предусматриваются использованные роликоопоры ленточных конвейеров, установленные вертикально и имеющие для предотвращения сползания шторок наваренные снизу ребра. Привод всех шторок осуществляется синхронно за счет

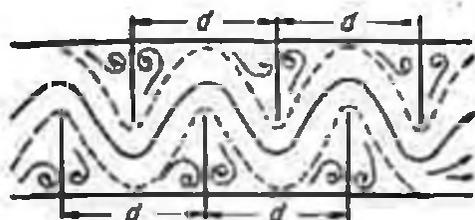
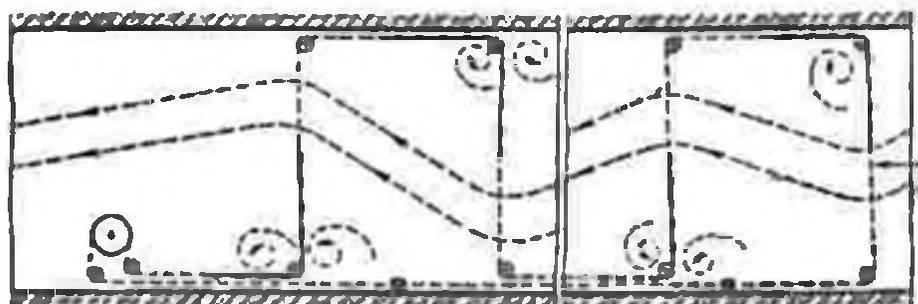


Рис. 8.3. Схема регулирующего органа типа «воздушный лабиринт»

Рис. 8.4. Схема шлангового варианта регулирующего органа типа «воздушный лабиринт»



вращения барабана (звездочек) от простейшего реверсивного двигателя с редуктором, например электросверла, пневмосверла, небольшой лебедки.

Рассмотренные выше регулирующие органы могут осуществлять только отрицательное регулирование.

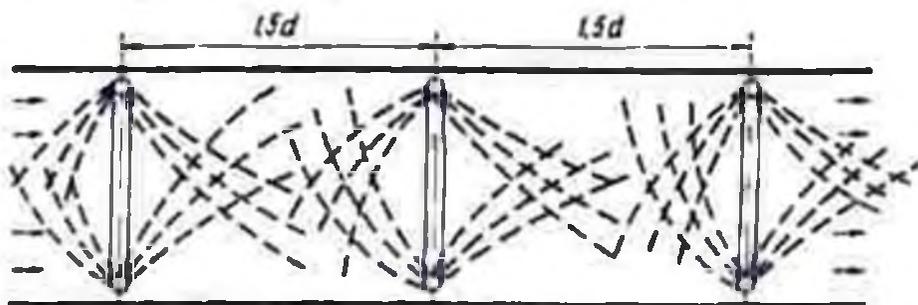


Рис. 8.5. Схема регулирующего органа типа «водная завеса»

Для осуществления регулирования подачи воздуха в широком диапазоне, включающем как положительное, так и отрицательное регулирование, предусмотрены регулирующие органы типа «водная завеса» и широкодиапазонный регулятор на базе буфера.

4. Регулирующий орган типа «водная завеса» (рис. 8.5) состоит из трех независимых секций водной завесы, установлен-

ных на расстоянии 1,5—3 диаметров выработки. Каждая секция, в свою очередь, должна включать три трубы, снабженные форсунками и устанавливаемые по периметру выработки. Каждая труба имеет возможность поворота от основного положения, когда форсунки расположены в плоскости, совпадающей с площадью поперечного сечения выработки, на $\pm 45-50^\circ$.

Аэродинамическое сопротивление завесы как отрицательного регулятора создается за счет сжатия потока направленными нормально или встречно ему струями воды и брызг, выбрасываемыми из форсунок, а величина его зависит как от угла встречи, так и от расхода и давления воды в трубе, преобразуемого в кинетическую энергию выбрасываемых из форсунок струй и брызг.

При согласованном с направлением движения воздуха выходе струй воды и брызг водяной завесы последние увлекают за собой воздушную массу, создают эжектирующее действие и способствуют повышению подачи воздуха на участок, т. е. в этом случае осуществляется положительное регулирование расхода воздуха.

Поскольку водяная завеса не загромождает сечения выработки, она может быть установлена как на выработках вентиляционного, так и откаточного горизонтов.

Установка строенных завес предусматривается из соображений повышения диапазона регулирования и возможности поочередного отключения завес с помощью системы фотореле с заданной выдержкой времени при движении транспорта и людей.

При установке одной завесы отключение ее на момент прохода человека или транспорта приводило бы к снятию ее регулирующего воздействия, нарушению режима проветривания и возникновению переходных газодинамических процессов; работа двух завес до некоторой степени устранила бы эти явления, однако аэродинамическое сопротивление завесы все еще колебалось бы на значительную величину, а то время как при трех завесах кратковременное или даже длительное отключение одной из них заметного влияния на изменение режима проветривания участка не должно оказывать. Кроме того, с учетом возможности засорения форсунок шахтной водой, установка тройной завесы значительно повышает ее надежность.

Более целесообразна установка водяной завесы на вентиляционном горизонте, где она наряду с выполнением своей основной функции может использоваться для пылеподавления, что особо важно на шахтах, опасных по взрывам угольной пыли. Подача воды к завесе может быть осуществлена как по трубопроводу с откаточного горизонта, куда она после выхода из форсунок самостоятельно возвращается в подбурник, так и с вышележащих горизонтов по трубам под естественным напором за счет разности отметок. Возможна применительно к конкретным условиям подача воды к завесе от небольших насосных станций на лодках бремсбергов, уэльсов и др.

Б. Широкодиапазонный регулятор расхода воздуха на базе вспомогательного вентилятора (рис. 8 б). Установка такого вентилятора предполагается в выработке через перегородку над щлюзом или кроссингом. Регулирующим органом является осевой вентилятор, снабженный диффузором и коллектором.

В заторможенном виде вентилятор с точки зрения аэродинамического сопротивления представляет собой окно, а при встречном вращении — еще и противонаправленный источник тяги (аналогично естественной). При согласованном вращении вентилятор увеличивает подачу воздуха на участок и осуществляет положительное регулирование.

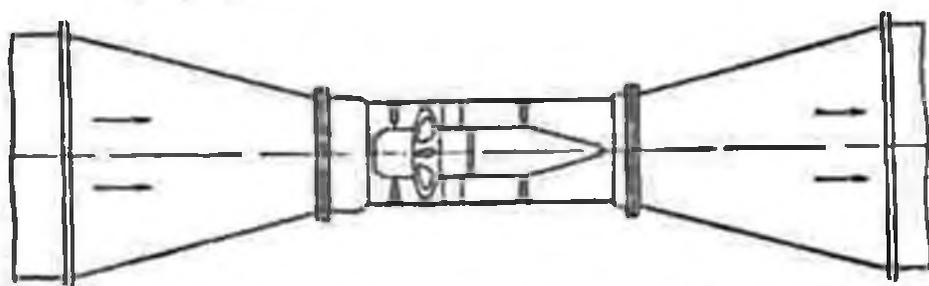


Рис. 8.б. Схема регулирующего органа на базе вспомогательного вентилятора.

В установке применен малогабаритный вентилятор с приводом постоянного тока, благодаря которому удается легко осуществлять изменение частоты вращения рабочего колеса вентилятора в широком диапазоне, а также изменение направления вращения.

При расположении регулятора в шахтных условиях на исходящей струе участка привод вспомогательного вентилятора может быть вынесен на свежую струю, а сам регулятор расположен на пересечении вентиляционной выработки с выработкой, подводящей свежую струю. При наличии большого количества регуляторов такого типа может быть значительно (в 2—3 раза) повышена экономичность проветривания шахт, а при работе вспомогательных вентиляторов в режиме динамического торможения при отрицательном регулировании — значительный возврат электроэнергии. Главное регулирование режима работы вентилятора может быть достигнуто как за счет применения направляющих аппаратов, так и изменения частоты вращения за счет гидромуфт, магнитных муфт, частотно-регулируемого привода и др.

В.3 АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ РЕГУЛЯТОРОВ РАСХОДА ВОЗДУХА

Приводимые ниже результаты исследований получены при проведении аэродинамического эксперимента в лабораторных условиях.

Исследования проводились на аэродинамических моделях — кольцевой модели, аэродинамической трубе ДГН.

Кольцевая аэродинамическая модель позволяет проводить:

1) исследование аэродинамических параметров и лабораторных образцов регулирующих органов регуляторов с целью установления диапазона изменений их аэродинамического сопротивления;

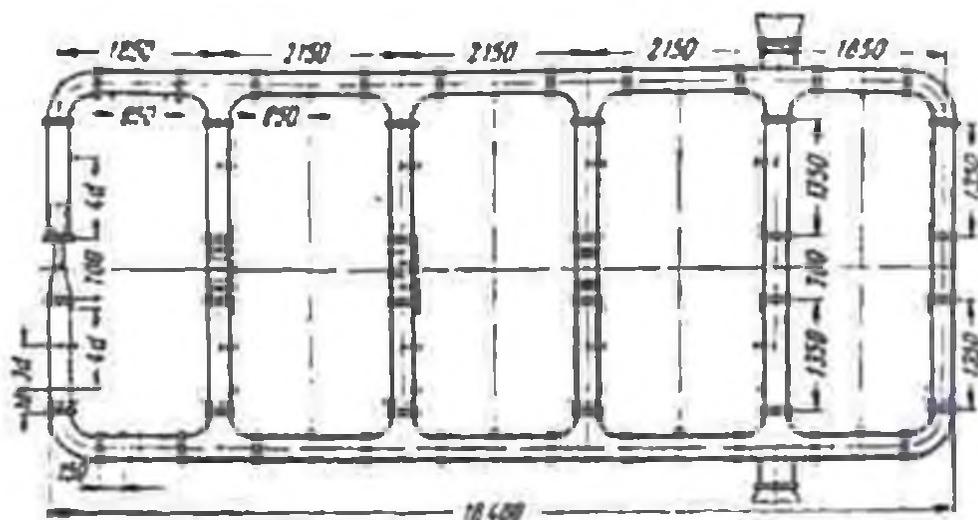
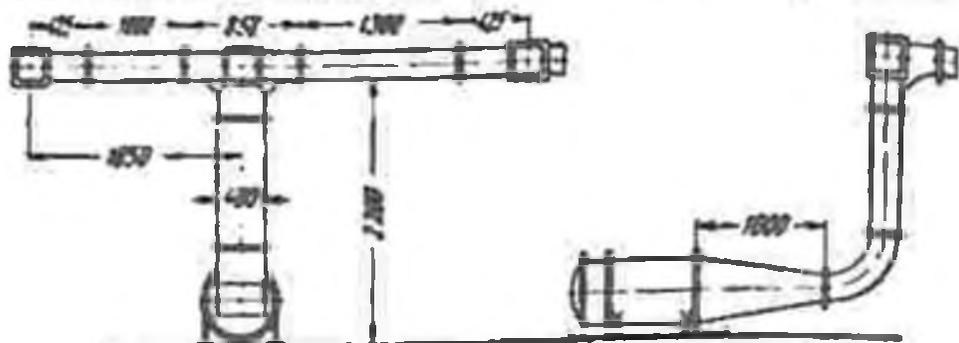


Рис. 8.7. Схема кольцевой аэродинамической модели

2) опробование и отработку системы перераспределения расхода воздуха в отдельных ветвях при регулировании проветривания по газовому фактору;

3) изучение характера переходных газодинамических процессов при регулировании проветривания шахт по газовому фактору (в совокупности с аэродинамической моделью лавы);

4) установление характера и зависимости взаимосвязанности воздушных потоков в сложной, близкой к реальной по схеме вентиляционной сети;

5) исследование вопросов нагнетательно-всасывающего проветривания и других.

Схема кольцевой аэродинамической модели с расстановкой характерных размеров приведена на рис. 8.7. Расчет модели,

произведенный из условия получения нормальных режимов работы вентиляторов ВПЭИ) в пределах типичной промышленности использования, удобных для выбора значений расхода и разностей давлений. Двухзначный геометрический масштаб милитирования показал, что при применении масштаба 1:10, давлении до 400 кгс/м², расходах до 5 м³/с эти параметры обеспечиваются при трубах квадратного сечения 250 × 250 мм и габаритов модели 7500 × 10 500 мм.

Математическая обработка результатов измерения проведена в основном методом наименьших квадратов и приближения кривых.

Ниже в качестве иллюстрации приводятся результаты расчета аналитической зависимости аэродинамического сопротивления одной секции регулирующего органа типа «воздушный лабиринт» как функции линейного перемещения ее.

На основании анализа полученных после обработки диаграмм $p = f(x)$, $Q = f(x)$, графиков $R = f(x)$ (порядок обработки виден из табл. 8.1), а также приводимого ниже аналитического описания характеристики регулирующего органа выбрали следующие формы кривых:

$$R = e^{-ax}; \quad (8.1)$$

$$R = \frac{A}{(b-x)^2} + B, \quad (8.2)$$

где b — ширина окна;
 x — текущее перемещение регулирующего органа;
 A, B — коэффициенты

Первая кривая после двухкратного логарифмирования превратилась в прямую линию:

$$b \ln R = \ln a + bx.$$

Обозначив $\ln \ln R = R$, получим $R = a + bx$. Постоянные коэффициенты находятся с помощью конечных разностей:

$$b = \frac{\Delta R}{\Delta x}.$$

Коэффициент a определим как среднее арифметическое из разностей $R_i - bx$:

$$a = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i - \sum_{i=1}^n bx \right). \quad (8.3)$$

Ход определения коэффициентов виден из табл. 8.2.

Таким образом, $R = e^{1,2 \cdot 27x}$.

Получение кривой второго вида осуществляется методом выравнивания точек и методом наименьших квадратов. Результаты вычислений сведены в табл. 8.3.

Таблица В.

№ водопровода	Давление (в делениях по диаграмме)						Расход (в делениях по диаграмме)										
	1	2	3	4	Отсчет сред- ний	Перепад давле- ния, кгс/м ²	1	2	3	4	Сред- ний	Истин- ный расход, м ³ /с	Q ⁰	R _{в.ис.}	R _{рег}	R _{рег}	ЦА
0	10,8	11,2	11,0	12,2	11,45	18,32	91,0	91,0	90,4	91,0	90,85	2,10	4,41	20,15	0	0	—
1	11,4	11,4	14,0	14,6	12,85	20,56	90,8	90,8	89,4	90,0	90,25	2,08	4,33	19,79	0,77	0,18	-0,745
2	13,4	13,8	17,0	18,0	15,55	24,88	90,0	90,0	88,0	88,6	89,15	2,06	4,24	19,38	5,50	1,30	0,114
3	16,3	17,0	20,0	21,0	18,63	29,76	88,5	88,6	86,8	87,2	87,75	2,04	4,16	19,01	10,75	2,58	0,412
4	20,0	21,2	24,8	27,0	23,00	36,80	87,2	87,2	84,0	85,0	85,85	1,987	3,96	18,10	18,70	4,72	0,675
5	25,6	26,3	31,0	33,8	29,18	46,69	85,4	85,4	80,0	81,4	83,05	1,92	3,69	16,86	29,83	8,10	0,908
6	32,0	33,8	37,0	40,0	35,70	57,12	81,7	82,2	76,2	78,2	79,60	1,84	3,39	15,50	41,53	12,23	1,085
7	38,3	40,0	45,2	48,3	42,95	68,72	77,8	78,4	71,0	73,0	75,05	1,73	2,99	13,66	55,06	18,41	1,265
8	45,8	48,0	52,0	54,5	50,00	80,00	72,6	74,2	65,8	67,8	70,10	1,62	2,62	11,97	68,00	25,25	1,418
9	62,0	54,6	58,0	60,2	56,20	89,92	67,0	69,4	59,2	62,0	64,40	1,49	2,22	10,14	79,78	35,92	1,555
10	68,0	60,6	63,0	65,2	61,70	98,72	60,0	63,0	51,0	51,0	57,00	1,31	1,74	7,95	90,77	52,20	1,718
11	63,0	65,4	69,0	71,0	66,85	106,96	52,5	55,0	44,5	45,0	49,25	1,14	1,30	5,94	101,02	88,61	1,947
12	67,4	72,0	75,5	79,3	73,60	117,60	45,4	49,0	36,8	39,4	42,65	0,98	0,96	4,39	113,21	117,93	2,072
13	76,0	80,0	83,0	87,4	81,60	129,76	37,4	41,0	29,8	32,4	35,15	0,81	0,66	3,02	126,74	192,03	2,283
14	87,2	89,5	92,1	95,0	90,95	145,62	30,0	32,0	21,2	24,6	26,95	0,62	0,38	1,74	143,78	378,37	2,578
15	92,0	93,0	95,0	95,8	93,95	160,32	22,0	24,0	10,8	15,0	17,95	0,41	0,16	0,73	149,59	934,94	2,971
16	93,6	93,6	95,8	95,8	94,70	161,62	13,0	16,0	9,0	11,0	12,25	0,28	0,08	0,36	151,26	1890,75	3,277

Примечание. R_{тп} = 4,57

Таким образом при методе наименьших квадратов критерием качества выбранной аналитической зависимости является условие минимизации суммы квадратов отклонений вычисленных значений функции от заданных значений, т. е. $\sum (y - y_i)^2$ должно быть минимальным.

Для определения коэффициентов искомого уравнения составлены в расчете системы нормальных уравнений

$$\begin{aligned} \sum R &= a \sum y^2 + nb, \\ \sum Ry &= a \sum y^3 + nbu. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Результаты вычислений коэффициентов по методу наименьших квадратов приведены в табл. 8.4.

Исходные уравнения (при $n = 6$):

$$213,65 = 204,77a + 6b; \quad a = 1,12;$$

$$1722,59 = 1546,02a + 31,86b; \quad b = -2,61.$$

Следовательно,

$$R = \frac{1,18}{(0,4 - x)^2} - 2,61.$$

Для сравнения на графике (рис. 8.8) приведены кривые 1, 2 и 3, полученные по результатам замеров.

Такими же методами обработаны данные и для других комбинаций совместной работы секций регулирующего органа.

В табл. 8.5 приводятся лишь результирующие аналитические зависимости.

Аэродинамические параметры регулирующего органа типа «сверхкратный воздушный карман». Испытания данного типа регулирующего органа осуществлялись на кольцевой аэродинамической модели и в аэродинамической трубе ДГИ. Методика испытаний и обработки результатов записи аналогичны описанной выше применительно к регулирующим органам типа жалюзиного и воздушного либринта.

Аналитические зависимости, описывающие характер изменения аэродинамического сопротивления как функцию угла поворота, получены методом наименьших квадратов и выпрямленных кривых (результаты обработки приведены в табл. 8.6).

Аэродинамические параметры регулирующего органа типа «сверхкратная водяная завеса». Для проведения исследований аэродинамических параметров этого типа регулятора предусмотрена одна из секций кольцевой аэродинамической трубы. Схема установки представлена на рис. 8.9. Установка состоит из аэродинамической модели для продувки завесы и регулирующей аппаратуры. Модель длиной около 10 м собрана из секций металлической трубы сечением 250 × 250 мм и имеет вентилятор «Промзвук ДА-2м». Водосем имеет емкость около 6 м³. Подачу воды осуществляют ориентальные насосы ОН-2, обеспечивающие давление до 12 кгс/см².

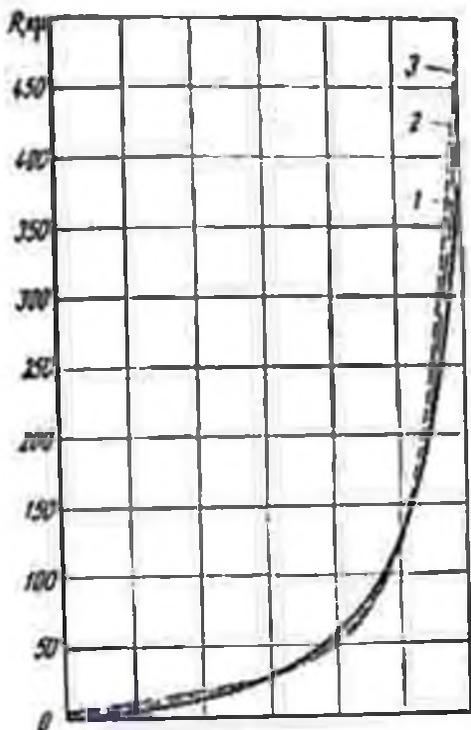


Рис. 8.6. Расчетные и экспериментальные кривые влияния кардинального сопротивления сопротивлению секции регулирующей проточной трубы сходящийся лабиринт

Рис. 8.7. Схема установки для исследования кардинального диаметровых вихревой

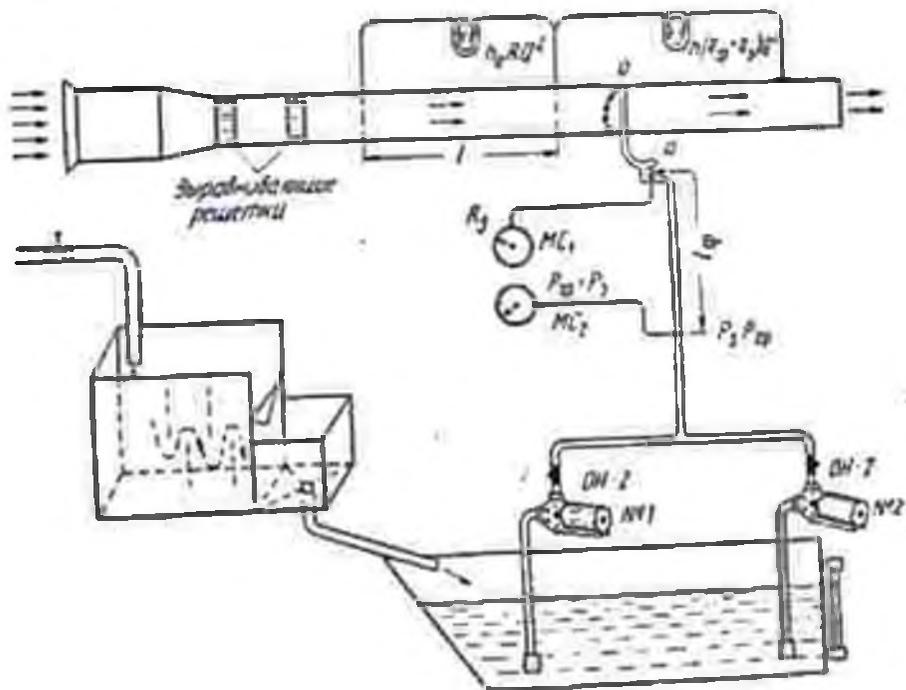


Таблица 8.4

x	y	y^2	x^2	R	Ry	$R_{\text{выч}}$	Ошибка д.д.
0,05	2,86	8,18	23,39	1,30	3,72	6,55	-5,25
0,10	3,33	11,09	35,93	4,70	15,65	9,81	-5,11
0,15	4,00	16,00	64,00	12,20	48,80	15,31	-3,11
0,20	5,00	25,00	125,00	28,25	126,20	25,39	-0,14
0,25	6,67	44,50	296,70	52,20	348,17	47,19	+6,01
0,30	10,00	100,00	1000,00	118,00	1180,00	109,39	+8,51
$\sum y=31,80$		$\sum y^2=204,77$	$\sum x^2=1546,02$	$\sum R=213,65$	$\sum Ry=1722,59$		

Таблица 8.5

Метод наименьших квадратов	Метод выравнивания точек	Метод наименьших квадратов	Метод выравнивания точек
$R_1 = \frac{1,12}{(0,4-x)^2} - 2,61$	$R_2 = \frac{1,24}{(0,4-x)^2} - 0,75$	$R_{1,2,3} = \frac{1,84}{(0,4-x)^2} - 15,55$	$R_{1,2,3} = e^{1,04e^{0,27x}}$
$R_{1,4} = \frac{3,58}{(0,4-x)^2} - 32,29$	$R_{1,4} = e^{1,51e^{0,22x}}$		
$R_{2,4} = \frac{2,51}{(0,4-x)^2} - 15,62$	$R_{2,4} = \frac{2,4}{(0,4-x)^2} - 11,15$	$R_{1+4} = \frac{9,1}{(0,4-x)^2} - 75,90$	$R_{1+4} = \frac{6,16}{(0,4-x)^2} - 39,31$
$R_{1,2} = \frac{1,55}{(0,4-x)^2} - 13,59$	$R_{1,2} = e^{1,07e^{0,25x}}$	$R_{1+6} = \frac{11,72}{(0,4-x)^2} + 17,77$	$R_{1+6} = \frac{17,58}{(0,4-x)^2} - 150,64$

Таблица 8.6

Метод наименьших квадратов	Метод взвешенных средних
$R_{1,1} = \frac{37,5 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 99$	$R_{1,1} = \frac{35 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 91$
$R_{1,2} = \frac{47 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 130$	$R_{1,2} = \frac{49,5 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 131,5$
$R_{1,3} = \frac{58 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 160$	$R_{1,3} = \frac{71 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 184$
$R_{1,4} = \frac{57,8 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 144$	$R_{1,4} = \frac{59,4 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 149$
$R_{1,5} = \frac{64,8 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 139$	$R_{1,5} = \frac{47 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 116$
$R_{1,2,3} = \frac{67 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 181$	$R_{1,2,3} = \frac{80 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 208$
$R_{1,2,4} = \frac{87,5 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 225$	$R_{1,2,4} = \frac{93 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 241$
$R_{1+4} = \frac{89,4 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 219$	$R_{1+4} = \frac{93 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 230$
$R_{1+5} = \frac{94,6 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2}$	$R_{1+5} = \frac{98,7 \cdot 10^4}{(90 - \alpha)^2} - 244,5$

В эксперименте применены самопишущие манометры, осуществляющие запись давления на входе в водяную завесу и в коллектор, подводящий воду от насосов. При периодической калибровке осуществляется подача воды в водоем через треугольное сливное отверстие. Приток воды устанавливается равным расходу, и замеряется перепад давления на участке трубы $a-a$, на основании которых определяется значение гидравлического сопротивления участка. В дальнейшем расход воды определяется по разности записей манометров MC_1 и MC_2 .

Аналогичная схема может быть применена и для регистрации расхода полдуха.

Поскольку аэродинамическое сопротивление регулирующего органа типа «водяная завеса» зависит как от угла поворота форсунок, так и от скорости движения (расхода) воды через завесу,

то серия экспериментов повторялась при трех-четырех различных значениях расхода воды в завесе.

Характер изменения аэродинамического сопротивления, создаваемого водяной завесой при встречном и попутном движении воздуха, представлен на рис. 8.10, а зависимость величины аэродинамического сопротивления регулирующего органа «водяная завеса» от расхода воды в ней для одного из положений (угла поворота) — на рис. 8.11. Замеры осуществлялись при скорости движения воздуха до 40 м/с вследствие чего динамический напор

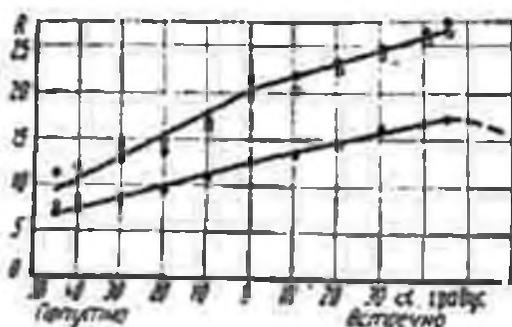


Рис. 8.10. Характер изменения аэродинамического сопротивления, создаваемого водяной завесой при встречном и попутном движении воздуха

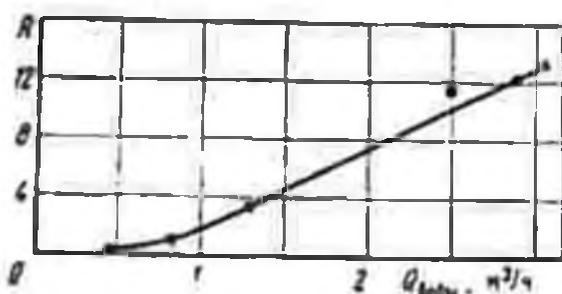


Рис. 8.11. Зависимость величины аэродинамического сопротивления регулирующего органа «водяная завеса» от расхода воды в ней для одного из положений (угла поворота)

воздуха составлял значительную величину, и кратность изменения аэродинамического сопротивления завесы оказалась небольшой. При меньших скоростях движения воздуха диапазон изменения R завесы значительно возрастает. Водяная завеса при малых скоростях движения воздуха способна останавливать и даже охлаждать воздушный поток.

Аэродинамические параметры регулирующего органа линейного изменения расхода воздуха. Регулирующий орган данного типа осуществляет отрицательное регулирование расхода воздуха, однако благодаря заранее заданному закону изменения аэродинамического сопротивления как функции перемещения, в отличие от других регулирующих органов, позволяет производить линейное изменение расхода воздуха.

Теоретические предпосылки расчета данного регулирующего органа приведены в следующем параграфе. Для их проверки нами был выполнен расчет регулирующего органа линейного изменения расхода воздуха в аэродинамической трубе ДГИ при работе на

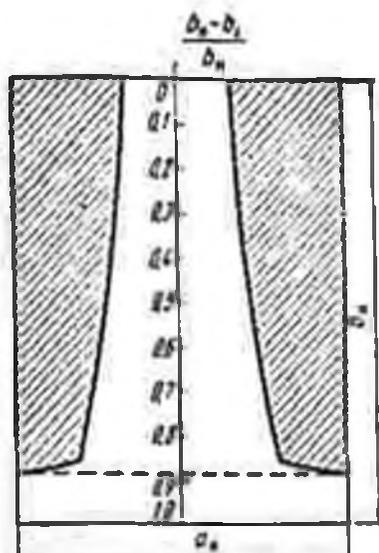


Рис. 8.12. Профиль для постоянного перепада давления

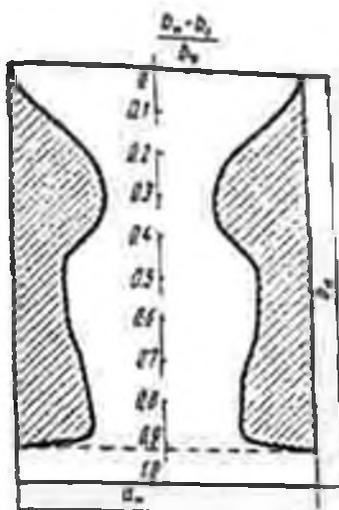


Рис. 8.13. Профиль для вентилятора «Проходка 500-2м»

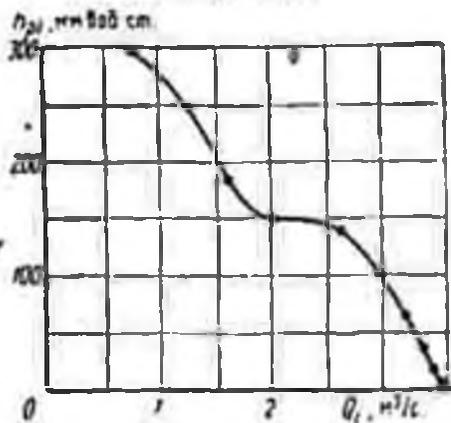


Рис. 8.14. Характеристики вентилятора «Проходка 500-2м»

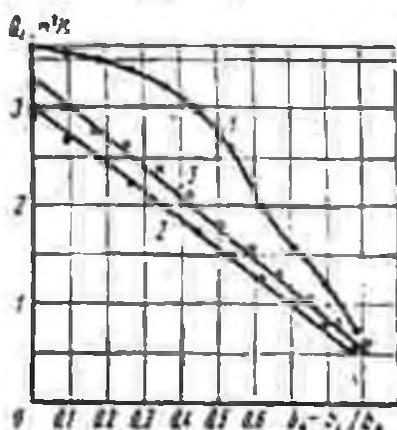


Рис. 8.15. Фактически и расчетные значения расхода воздуха при регулировании
1 — значение Q при регулировании обычным способом, 2, 3 — расчетные значения Q при $h \sim \cos^2 \alpha$ и $h \sim \sin^2 \alpha$

нее вентилятора «Проходка 500-2м», имеющего существенно нелинейную характеристику зависимости $h \sim f(Q)$. На рисунках приводятся графики, дающие представление о profile регулирующего органа при постоянной депрессии участка (рис. 8.12) и депрессии, нелинейно изменяющейся с ростом производительности вентиляторной установки (на рис. 8.13 приведено очертание арматуры регулирующего органа для линейного регулирования расхода воздуха в модели при работе вентилятора «Проходка 500-2 м» в пределах всей характеристики, включая нерабочую ее часть за перегибом). Характеристика вентилятора представлена на рис. 8.14.

Фактически и расчетное изменение расхода воздуха при регу-
лировании для обоих случаев $h = \text{const}$ и $h = \text{var}$ приведены
на рис. 8.13.

Из рис. 8.13 из приведенных графиков, осуществлено линейное
изменение расхода воздуха в широком диапазоне ($\frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{min}}} = 6$)
при существенно нелинейной, не поддающейся точному аналити-
ческому описанию зависимости между развиваемой вентилятором
давлением и подаваемым им количеством воздуха. Рас-
хождение расчетных данных с фактическими незначительно и не
выходит за пределы погрешностей инженерных расчетов в про-
ветривании шахт.

При расчете не принималось во внимание уменьшение преде-
лов регулирования за счет установки «маски». Учет его приводит
к увеличению погрешности в определении диапазона регулиро-
вания.

8.4. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА ЛИНЕЙНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА

Выше приведены аналитические зависимости, описывающие
связь между величинами аэродинамических сопротивле-
ний регулирующих органов и их перемещением, полученные на
основании обработки результатов измерений, выполненных на
рис. 8.13. Хотя они и представляют собой значительную ценность
в деле создания системы автоматического регулирования про-
ветривания шахт и математического описания ее элементов, тем
не менее эти зависимости мало пригодны для конструктивного
расчета параметров регулирующих органов.

На основании многочисленных аэродинамических экспери-
ментов по определению параметров различных типов регулирую-
щих органов для первых четырех типов получены существенно
важнейшие аэродинамические характеристики, затрудняющие
учет их при расчетах проветривания и использовании регуляторов
в системе автоматического регулирования проветривания шахт.
В связи с этим нами поставлена и решена задача создания регули-
рующего органа такого типа, который бы обеспечил линейное
изменение расхода воздуха при его перемещении независимо от
начального его положения.

Установление аэродинамических характеристик регулиру-
ющего органа удобнее вести для простого случая. Рассмотрим слу-
чай, когда движение воздуха обеспечивается источником с посто-
янной величиной перепада давления $h = \text{const}$.

Максимальный расход воздуха, протекающего по выработке
при отсутствии или полностью приведенном регулирующем органе,
обозначает Q_0 . При отрицательном регулировании расход воз-
духа будет уменьшаться. Требуемый закон изменения расхода
воздуха — линейный, т. е.

$$Q = Q_0 - Cx, \quad (8.5)$$

где Q — текущие значения количества воздуха, протекающего по выработке при регулировании;

C — некоторый коэффициент пропорциональности, определяющий тангенс угла наклона линии изменения расхода к оси;

x — величина линейного перемещения регулирующего органа.

Очевидно, граничными условиями, определяющими пределы изменения регулирующих параметров, будут:

при $Q = Q_0$ $x = 0$,

при $Q = Q_{\max}$ $x = b - l$,

где b — ширина выработки;

l — максимальная величина перемещения регулирующего органа.

Из принятого условия постоянства депрессии $h = \text{const}$ вытекает, что

$$R_n Q_0^2 = h \text{ и } R_n (Q_0 - Cx)^2 = h,$$

или

$$R_n Q_0^2 = R_n (Q_0 - Cx)^2 = R_n Q_n^2. \quad (8.6)$$

Если заданная (или требуемая) величина глубины регулирования

$$k = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_n}{Q_0 - Cx_{\max}}, \quad (8.7)$$

то $Q_n = k Q_0 = k C x_{\max}$ или, после подстановки значения $x_{\max} = b - l$, тангенс угла наклона линии регулирования расхода воздуха будет

$$C = \frac{Q_0 (k - 1)}{k (b - l)}. \quad (8.8)$$

С другой стороны, необходимый диапазон изменения аэродинамического сопротивления для обеспечения заданной глубины регулирования определяется из соотношения

$$R_n Q_n^2 = R_n \left(\frac{Q_0}{k} \right)^2,$$

откуда

$$R_n = R_n A^2. \quad (8.9)$$

Начальное сопротивление включает в себя сопротивление выработки и арматуры полностью открытого регулирующего органа, т. е.

$$R_n = R_0 + R_{\text{отк}}. \quad (8.10)$$

Поскольку может быть бесконечно большое число положительных величин аэродинамического сопротивления, вносимого в систему установкой арматуры регулирующего органа, то, по-видимому, в самом начале необходимо задаться допустимым с инженерной точки зрения уменьшением расхода воздуха по выработке (например, 5—10%) за счет ее начального загромождения.

Обозначим отношение количества воздуха, протекающего по выработке после установки арматуры регулирующего органа, к количеству воздуха, протекающего по незагроможденной выработке, через

$$\rho = \frac{Q_0}{Q_n}, \quad (8.11)$$

тогда

$$R_n = \frac{h}{Q_n^2} = \frac{h}{\rho^2 Q_0^2} = \frac{h}{\rho^2 \left(\sqrt{\frac{h}{\alpha \rho L}} \right)^2} = \frac{h}{\rho^2 \left(\frac{h}{R_0} \right)^2} = \frac{R_0}{\rho^2}, \quad (8.12)$$

откуда максимальное вносимое установкой арматуры регулирующего органа аэродинамическое сопротивление из условия обеспечения допустимого принятого снижения расхода воздуха по выработке не должно превышать

$$R_{ок} = R_n - R_0 = \frac{R_0}{\rho^2} - R_0 = R_0 \left(\frac{1 - \rho^2}{\rho^2} \right). \quad (8.13)$$

Максимальное вносимое регулирующим органом аэродинамическое сопротивление для обеспечения заданной глубины регулирования определим из приведенных выше соотношений.

Из $R_0 = h/Q_0^2$, а с учетом $R_n = h k^2 / Q_n^2$, но из $h/Q_0^2 = R_0/\rho^2$, следовательно, $R_n = R_0 k^2 / \rho^2$ с другой стороны,

$$Q_n^2 = \frac{h}{R_n + R_{ок \max}}$$

откуда

$$R_n = R_0 + R_{ок \max};$$

$$R_{ок \max} = R_{ок} - R_n = \frac{R_0 k^2}{\rho^2} - \frac{R_0}{\rho^2} = \frac{R_0}{\rho^2} (k^2 - 1). \quad (8.14)$$

Установка арматуры регулирующего органа и его действие равноценны отрицательному способу регулирования с помощью вентиляционного окна.

На основании известных из рудничной аэродинамики зависимостей сопротивление окна определяется выражением

$$R_{ок} = \frac{(S - \mu S_0)^2 \gamma}{2g S^2 S_{ок}^3}$$

где S — площадь сечения выработки в месте установки окна;
 μ — коэффициент сжатия струи в окне;
 $S_{ок}$ — площадь окна;
 γ — объемный вес воздуха;
 g — ускорение свободного падения.

Соответственно подсчитанному по (8.13) вносимому аэродинамическому сопротивлению арматуры регулирующего органа максимальная площадь окна будет

$$S_{ок\ max} = \frac{S}{\mu_1 + S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \sqrt{R_{ок}}}} =$$

$$= \frac{S}{\mu_1 + S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \sqrt{R_0} \left(\frac{1-\rho^2}{\rho^2}\right)}} = \frac{S}{\mu_1 + \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{2g\alpha PL(1-\rho^2)}{\gamma S}}}, \quad (8.15)$$

а при регулировании подачи воздуха до Q_0 с учетом (8.14)

$$S_{ок\ min} = \frac{S}{\mu_1 + S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_{ок\ max}}} =$$

$$= \frac{S}{\mu_1 + \frac{S}{\rho} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0 (k^2 - 1)}}$$

Итак, граничными условиями обеспечения заданной глубины регулирования при допустимом максимальном снижении расхода воздуха по выработке будет

$$\frac{S}{\mu + \frac{S}{\rho} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0 (1-\rho^2)}} > S > \frac{S}{\mu_1 + \frac{S}{\rho} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0 (k^2 - 1)}}$$

Величину аэродинамического сопротивления регулирующего органа для любого промежуточного расхода воздуха получим из (8.6) и (8.13).

Поскольку $h = const$, то

$$R_{ок\ i} = \frac{h}{Q_i^2} = \frac{h}{(Q - Cx)^2},$$

а с учетом (8.13)

$$R_{ок} = \frac{h}{(Q - Cx)^2} - R_0,$$

или, подставив значение C , получим

$$R_{ок} = \frac{h}{\left[Q_0 - \frac{Q_0(k-1)}{k(b-1)}x\right]^2} - R_0 =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{k}{Q_0^2} \frac{1}{\left[1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right]^2} - R_0 = \\
 &= R_0 \left\{ \frac{1}{\left[1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right]^2 \rho^2} - 1 \right\}. \quad (8.16)
 \end{aligned}$$

Характер нарастания аэродинамического сопротивления по длине x получим, продифференцировав выражение (8.16),

$$\frac{dR_{\text{аэ}}}{dx} = \frac{2 \frac{k-1}{k(b-1)} R_0}{\left[1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right]^3 \rho^2}. \quad (8.17)$$

Подставив значение $R_{\text{аэ}}$ из (8.16) в выражение для подсчета $S_{\text{окн}}$, получим текущие значения площади окна для любого промежуточного положения регулирующего органа, при котором $Q_0 < Q < Q_0$.

$$S_{\text{окн}} = \frac{S}{\mu_1 + S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0 \left\{ \frac{1}{\left[1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right]^2 \rho^2} - 1 \right\}}}. \quad (8.18)$$

Характер изменения площади окна по длине перемещения регулирующего органа x получим, продифференцировав выражение (8.18):

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_{\text{окн}}}{dx} &= \frac{S^2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0} \frac{k-1}{k(b-1) \rho^2}}{\left[1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right]^2 \times} = \\
 &\times \left[\mu_1 + S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0 \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right)^2 \rho^2} - 1 \right)} \right]^2 \times \\
 &\times \sqrt{\frac{1}{\rho^2 \left(1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right)^2} - 1} \\
 &= \frac{S^2 \frac{k-1}{k(b-1) \rho^2} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0}}{\left[1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right]^2 \times} \\
 &\times \left[\sqrt{\frac{\mu_1}{\left(1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right)^2 \rho^2} - 1} + S \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_0} \right]^2 \times \\
 &\times \left[\frac{1}{\rho^2 \left(1 - \frac{k-1}{k(b-1)} x\right)^2} - 1 \right]^{3/2} \quad (8.19)
 \end{aligned}$$

Выведенные аналитические зависимости получены для случая $h = \text{const}$, что справедливо при проветривании выработки за счет естественной тяги, а также с некоторыми допущениями при проветривании центробежным вентилятором с горбатой характеристикой, работающим вблизи перегиба кривой или при наличии большого количества параллельных соединений, для которых изменение аэродинамического сопротивления в одной ветви в некоторых пределах не приводит к заметному изменению разности давлений в узловых точках.

При наличии слаборазветвленной сети, проветриваемой осевым вентилятором, погрешности расчета профиля линейного регулирующего органа и отклонение его параметров от расчетных, определенных по приведенным выше аналитическим зависимостям, могут быть значительными. В связи с этим рассмотрим наиболее ярко выраженный случай влияния характеристики вентилятора на параметры линейного регулирующего органа — при работе осевого вентилятора на неразветвленную сеть с установленным линейным регулирующим органом.

Как известно, характеристика вентилятора в пределах области промышленного использования с достаточной степенью точности может быть представлена зависимостью

$$h = A - bQ^2,$$

где A — начальная условная развиваемая вентилятором разность давлений при нулевом расходе;

b — эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентилятора.

Итак, характеристика вентилятора представлена зависимостью $h = A - bQ^2$, закон изменения расхода $Q = Q_0 - Cx$, граничные условия: при $Q = Q_0$ перемещение регулирующего органа $x = 0$; при $Q = Q_{\text{сн}}$ $x = b = l$.

Кратность регулирования

$$k = \frac{Q_0}{Q_0 - Cx}; \quad C = \frac{Q_0(k-1)}{k(b-l)}.$$

Перепад давлений, затрачиваемый на продвижение по выработке воздуха:

для Q_0

$$A - bQ_0^2 = R_n Q_0^2;$$

для Q_1

$$A - b(Q_0 - Cx_1)^2 = R_1 (Q_0 - Cx_1)^2.$$

(8.20)

Из уравнений (8.20) могут быть составлены равенства:

$$A = R_n Q_0^2 + bQ_0^2 = (R_n + b) Q_0^2;$$

$$A = R_1 (Q_0 - Cx_1)^2 + b(Q_0 - Cx_1)^2 = (R_1 + b) (Q_0 - Cx_1)^2$$

$$(R_n - b) Q_0^2 = (R_1 + b) (Q_0 - Cx_1)^2.$$

После преобразований получим

$$\left(\frac{Q_0}{Q_0 - C_x}\right)^2 = \frac{R_0 + b}{R_0 + b} \text{ или } \frac{R_0 + b}{R_0 + b} = k^2. \quad (8.21)$$

Таким образом, если принять во внимание внутреннее сопротивление вентилятора, задача сводится к предыдущей:

По аналогии с (8.11):

$$Q_0 = \rho Q_x = \rho \sqrt{\frac{A}{R_0 + b}}; \quad (8.22)$$

$$R_0 = \frac{A}{\rho^2 Q_x^2} = \frac{A}{\rho^2 \left(\sqrt{\frac{A}{R_0 + b}}\right)^2} = \frac{R_0 + b}{\rho^2}. \quad (8.23)$$

откуда максимально вносимое установкой арматуры регулирующего органа аэродинамическое сопротивление из условия обеспечения принятого допустимого снижения расхода по выработке не должно превышать

$$R_{0\max} = R_0 - (R_0 + b) = \frac{R_0 + b}{\rho^2} - (R_0 + b) = (R_0 + b) \frac{1 - \rho^2}{\rho^2}. \quad (8.24)$$

Соответственно максимальная незагроможденная площадь живого сечения потока после установки арматуры регулирующего органа составит

$$S_{0\max} = \frac{S_0}{\mu + S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} \sqrt{R_{0\max}}} = \frac{S_0}{\mu + S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} (R_0 + b) \frac{1 - \rho^2}{\rho^2}}. \quad (8.25)$$

Для уменьшения подачи воздуха по Q_x для обеспечения кратности регулирования k необходимое аэродинамическое сопротивление окна может быть определено из зависимости:

$$A = (R_x + b)(Q_0 - C_x)^2 = (R_x + b)Q_{0\min}^2.$$

но

$$R_x = R_0 + R_{0\min} \text{ и } Q_{0\min}^2 = \frac{A}{R_0 + R_{0\min} + b}$$

или

$$R_0 + R + R_{0\min} = \frac{A}{Q_{0\min}^2} = \frac{Ak^2}{Q_0^2}.$$

Поскольку

$$\frac{A}{Q_0^2} = \frac{R_0 + b}{\rho^2}, \text{ то}$$

$$R_{0\min} = (R_0 + b)^2 k - \frac{R_0 + b}{\rho^2} = (R_0 + b) \frac{(k^2 - \rho^2)}{\rho^2}. \quad (8.26)$$

Отсюда минимальная площадь живого сечения потока

$$S = \frac{S_0}{\mu_1 + \frac{\gamma}{\rho} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b) (1 - p^2)}}$$

Итак, граничными условиями обеспечения заданной глубины регулирования при допустимом нормальном сжатии воздуха в выработке будут

$$\begin{aligned} \frac{S_0}{\mu_1 + \frac{\gamma}{\rho} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b) (1 - p^2)}} &> S > \\ &> \frac{S_0}{\mu_1 + \frac{\gamma}{\rho} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b) (1 - p^2)}}. \end{aligned} \quad (8.27)$$

Величина аэродинамического сопротивления регулирующего органа для любого текущего значения расхода воздуха

$$Q_0 > Q_i > Q_0.$$

будет

$$A - bQ_i^2 = (R_0 + R_{\text{ог}}) Q_i^2$$

или

$$R_{\text{ог}} = \frac{A - bQ_i^2 - R_0 Q_i^2}{Q_i^2} = \frac{A - (R_0 + b) Q_i^2}{Q_i^2}.$$

Поскольку $Q_i \sim Q_0 - Cx$, то

$$R_{\text{ог}} = \frac{A - (R_0 + b)(Q_0 - Cx)^2}{(Q_0 - Cx)^2} = \frac{A}{(Q_0 - Cx)^2} - (R_0 + b).$$

Подставив значение C через параметры регулирования, получим

$$\begin{aligned} R_{\text{ог}} &= \frac{A}{\left[Q_0 - \frac{Q_0(b-1)}{k(b-1)} x \right]^2} - (R_0 + b) = \\ &= \frac{A}{Q_0^2 \left[1 - \frac{b-1}{b(b-1)} x \right]^2} - (R_0 + b). \end{aligned}$$

а поскольку $\frac{A}{Q_0^2} = \frac{R_0 + b}{\rho^2}$, то

$$R_{\text{ог}} = (R_0 + b) \left[\frac{1}{\left[1 - \frac{b-1}{b(b-1)} x \right]^2 \rho^2} - 1 \right]. \quad (8.28)$$

Характер нарастания аэродинамического сопротивления регулирующего органа по длине x получим, продифференцировав выражение (8.28)

$$\frac{dR_{02}}{dx} = \frac{d[(R_0 + b)] \left\{ \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]} \right\}}{dx} =$$

$$= \frac{2(R_0 + b) \frac{k-1}{k(b-l)}}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]} \quad (8.29)$$

Площадь живого сечения потока в плоскости регулирующего органа для любого текущего значения x :

$$S_{02} = \frac{S_0}{\mu_1 + S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} R_{02}}} =$$

$$= \frac{S_0}{\mu_1 + S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \sqrt{\frac{A}{\left[\left(Q_0 - \frac{Q_0(k-1)}{k(b-l)} x \right)^2 - (R_0 + b) \right]}}} =$$

$$= \frac{S_0}{\mu_1 + S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b) \left\{ \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]} \right\}}} \quad (8.30)$$

Характер изменения площади живого потока при перемещении регулирующего органа определяется производной $\frac{dS_{02}}{dx}$:

$$\frac{dS_{02}}{dx} = \frac{S_0 \rho^2 \frac{k-1}{k(b-l)} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b)}}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]^2 \times$$

$$\times \left(\mu_1 + S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b) \left\{ \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]} \right\}} \times \right.$$

$$\left. \times \sqrt{\frac{1}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]}} \right) \times$$

$$= \frac{S_0 \rho^2 \frac{k-1}{k(b-l)} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b)}}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]^2 \times} \quad (8.31)$$

$$\times \left[\sqrt{\frac{1}{\left[\left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 \rho^2 - 1 \right]}} + S_0 \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (R_0 + b)} \right]^2 \times$$

$$\times \left[\frac{1}{\rho^2 \left(1 - \frac{k-1}{k(b-l)} x \right)^2 - 1} \right]^{3/2}$$

Приведенные зависимости позволяют определять профиль регулирующего органа линейного изменения расхода воздуха практически для всех встречающихся в шахтных вентиляционных сетях случаев. Можно получить аналогичные зависимости для слаборазветвленных сетей, являющихся промежуточными между рассмотренными выше двумя группами. Однако более простым решением для таких сетей является нахождение параметров эквивалентного вентилятора, работающего на сеть, содержащую выработку, регулирующей орган и внутреннее сопротивление эквивалентного вентилятора.

8.5. ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА С НЕЛИНЕЙНЫМ ЗАКОНОМ ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА

К этой группе относятся рассмотренные нами выше регуляторы типа «воздушный лабиринт», многократный воздушный карман, многократная водяная завеса, имеющие, несмотря на их конструктивное отличие, много общего в характере влияния на регулирующую воздушную струю, особенно, если принять во внимание, что угловые перемещения створок воздушного кармана могут быть легко трансформированы и заменены линейным перемещением, т. е.

$$x_n = 2\psi_1 r \sin \theta, \quad (8.32)$$

где x_n — эквивалентное поступательное перемещение;

ψ_1 — коэффициент, учитывающий различие в характере завихрений в кутках воздушного кармана и прямоугольном кутке воздушного лабиринта. Подобным образом можно привести к аналогу воздушного лабиринта водяную завесу при отрицательном регулировании;

r — длина створки;

θ — угол поворота створки, т. е. угол между стенкой выработки и створкой.

Рассматривая регулирующей орган типа «воздушный лабиринт» как серию установленных в шахматном порядке окон, можно применить для их описания классические формулы гидромеханики.

Перепад давления в окне, установленном в выработке,

$$h_{\text{ок}} = \frac{v_{\text{ок}}^2}{2g} - \frac{v_{\text{в}}^2}{2g},$$

где $v_{\text{ок}}$ — средняя скорость движения воздуха в окне;

$v_{\text{в}}$ — средняя скорость движения воздуха в выработке.

Но скорость движения воздуха в окне может быть подсчитана так

$$v_{\text{ок}} = \frac{Q}{\mu(b-x)a},$$

где a — высота окна;

x — степень открывания окна ($0 < x < b$);

b — полная ширина окна.

Принимая во внимание минимальное начальное загромождение, а также регулирующими органами, из условия обеспечения максимальной глубины регулирования и экономичности проветривания шахт можно принять $S_0 \approx ba$.

Тогда

$$h_{\text{ок}} = \frac{\gamma}{2g} \frac{Q^2}{\mu^2(b-x)^2 a^2} - \frac{\gamma Q^2}{2g^2 \mu^2 a^2},$$

по $h_{\text{ок}} = R_{\text{ок}} Q^2$, откуда

$$R_{\text{ок}} Q^2 = \frac{\gamma}{2g} \frac{Q^2}{\mu^2} \left(\frac{1}{(b-x)^2} - \frac{1}{b^2} \right)$$

или

$$R_{\text{ок}} = \frac{\gamma}{2ga^2} \left[\frac{1}{\mu^2(b-x)^2} - \frac{1}{\mu^2 b^2} \right]. \quad (8.33)$$

Скорость нарастания аэродинамического сопротивления окна соответственно будет

$$\frac{dR_{\text{ок}}}{dx} = \frac{2\gamma}{2ga^2 \mu (b-x)^3} = \frac{\gamma}{ga^2 \mu^2 (b-x)^3}. \quad (8.34)$$

Общее аэродинамическое сопротивление λ секций воздушного лабиринта зависит от расстояния между ними.

При установке секций на достаточно больших расстояниях, когда струя, расширившись после прохода сужения окна успевает полностью заполнить выработку, каждая секция действует как самостоятельное окно, а общее аэродинамическое сопротивление регулирующего органа, содержащего λ секций при синхронной их работе, будет

$$R_{\lambda} = \frac{\gamma \lambda}{2ga^2} \left[\frac{1}{\mu^2(b-x)^2} - \frac{1}{\mu^2 b^2} \right]. \quad (8.35)$$

При сближенной установке секций регулирующего органа обеспечиваемые ими суммарное аэродинамическое сопротивление может значительно отличаться от определяемого зависимостью (8.35).

В самом деле, рассматривая в первом приближении процессы движения воздуха в зоне действия регулирующего органа со сближенной установкой секций (рис. 8.6) (пренебрегая потерями

энергии за счет многократного перераспределения профили скоростей), можно отметить следующие моменты в районе регулирующего органа: в начальном участке перемещения при малых скоростях регулирующий орган ведет себя как серия независимых окон до тех пор, пока сохраняется неравенство

$$x \operatorname{ctg} \alpha_{расш} + x \operatorname{ctg} \alpha_{сж} < l,$$

где $\alpha_{расш}$ — угол расширения свободной струи после окна;
 $\alpha_{сж}$ — угол поджатия (сужения) струи на входе в окно;
 l — расстояние между двумя смежными секциями регулятора.

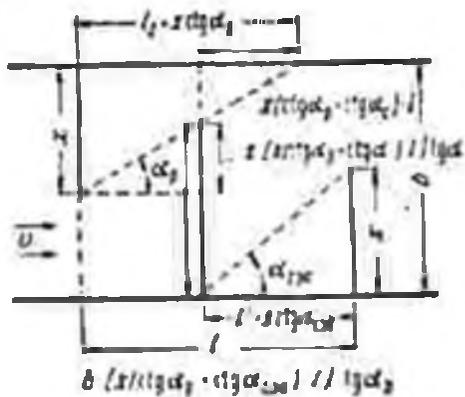


Рис. 8-16. Схема и вывод аналитической зависимости для регулирующего органа типа «воздушный лабиринт» при сбалансированной установке секций

Аэродинамическое сопротивление регулирующего органа в пределах синхронного перемещения отдельных секций на величину

$$0 < x < \frac{l}{\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2}$$

равно сумме аэродинамических сопротивлений отдельных секций и определяется выражением (8.35).

Очевидно, если максимальное перемещение регулятора $x_{max} < \frac{l}{\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2}$, то регулирующий орган в пределах всей рабочей зоны действует аналогично серии независимых окон. Критерием для суждения о наличии взаимного влияния могут служить неравенства:

при $l > x_{max} (\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2)$ — секции регулирующего органа не оказывают влияния друг на друга во всем диапазоне перемещения регулирующего органа;

при $l < x_{max} (\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2)$ — секции регулирующего органа в пределах интервала

$$0 < x_{эф} = \frac{l}{\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_2}$$

не оказывают влияния друг на друга и в пределах $x_{эф} < x < x_{max}$ оказываются взаимосвязанными, а общее создаваемое ими аэро-

динамическое сопротивление оказывается меньше суммы независимо работающих секций.

Действительно, перепад давления при прохождении первой секции:

$$h = h_1 + h_{11} + \dots + h_n;$$

$$h_1 = \frac{\gamma \alpha_n^2}{2g} - \frac{\gamma \alpha_p^2}{2g} = \frac{\gamma Q^2}{2g \mu_0^2 (b-x)^2 a^2} - \frac{\gamma Q^2}{2g \mu_0^2 (b-x)^2 a^2} \frac{1}{\left| b - [x (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \alpha_c) - l] \operatorname{tg} \alpha_p \right|^2};$$

второй

$$h_{11} = \frac{\gamma Q^2}{2g \mu_0^2 (b-x)^2 a^2} - \frac{\gamma Q^2}{2g \mu_c^2 a^2 \left| b - [x (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \alpha_c) - l] \operatorname{tg} \alpha_p \right|^2};$$

последний

$$h_n = \frac{\gamma Q^2}{2g \mu_0^2 (b-x)^2 a^2} - \frac{\gamma Q^2}{2g a^2 b^4}.$$

Общая потеря давления на регулирующем органе

$$h_{p, o} = \frac{\pi \gamma Q^2}{2g \mu_0^2 (b-x)^2 a^2} - \frac{\gamma Q^2 (n-1)}{2g \mu_0^2 a^2 \left| b - [x (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \alpha_c) - l] \operatorname{tg} \alpha_p \right|^2}. \quad (8.36)$$

Поскольку эквивалентное аэродинамическое сопротивление местного сопротивления определяется как отношение вызванного им перепада давления к квадрату расхода воздуха, то текущее значение аэродинамического сопротивления регулирующего органа в области, где проявляется взаимное влияние смежных секций друг на друга, будет

$$R = \frac{\pi \gamma}{2g \mu_0^2 (b-x)^2 a^2} - \frac{(n-1) \gamma}{2g \mu_0^2 a^2 \left| b - [x (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \alpha_c) \operatorname{tg} \alpha_p] \right|^2} \frac{\gamma}{2g a^2 b^4}.$$

Соответственно градиент изменения аэродинамического сопротивления по длине перемещения регулирующего органа представляет собой производную $\frac{dR}{dx}$:

$$\frac{dR}{dx} = \frac{\pi \gamma}{g \mu_0^2 (b-x)^2 a^2} - \frac{(n-1) \gamma (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \alpha_c) \operatorname{tg} \alpha_p}{g \mu_0^2 a^2 \left| b - x (\operatorname{ctg} \alpha_p + \operatorname{ctg} \alpha_c) \operatorname{tg} \alpha_p \right|^3}.$$

8.6. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ ЗАВЕСЫ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВНЕШНИХ УТЕЧЕК ВОЗДУХА

Внешние утечки воздуха часто достигают 50% и более. Уменьшение внешних утечек приводит к перераспределению воздуха в шахте. Внешние утечки воздуха можно уменьшить устройством воздушной завесы по периметру ствола в надшахтном здании, перекрывающей площадь ствола.

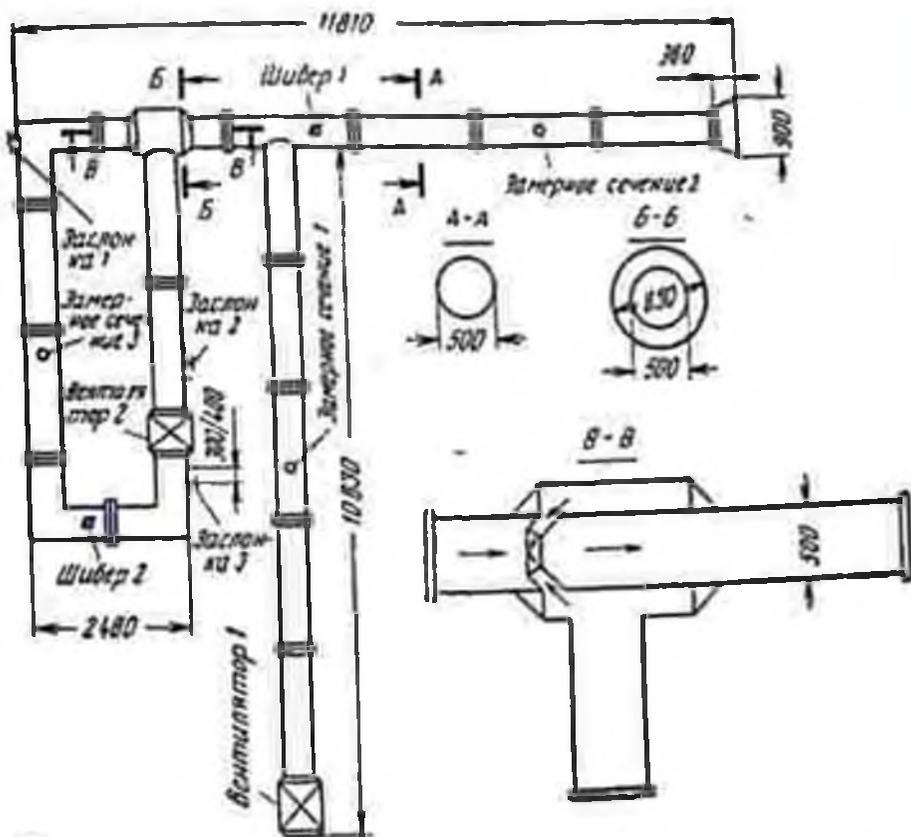


Рис. 8.17. Схема модели

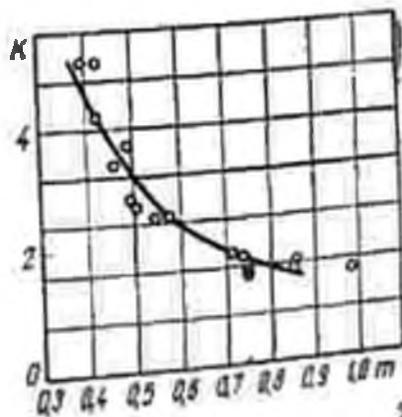


Рис. 8.18. График зависимости между Q и K

При устройстве воздушной завесы вентилятор, подводящий воздух в завесу, должен размещаться в пределах герметического надшахтного здания или принудительно забор воздуха из надшахтного здания.

Если для воздушной завесы осуществляется забор воздуха вентилятором из пределов надшахтного здания, то, как показывают исследования, внешние утечки не только не уменьшаются, но даже возрастают.

Расход воздуха из щели для получения заданного уменьшения величины внешних утечек определяется [67]

$$Q_m = \sqrt[3]{\frac{25^2 Q_1 (R_1 Q_1^{13} - R_2 Q_2^{13})}{\rho \sin^3 \alpha}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (8.37)$$

где S_m — площадь выходного отверстия щели, м²;
 R_1, R_2 — аэродинамические сопротивления соответственно шахты (до канала вентилятора) и надшахтного здания с учетом ствола (от устья до клина вентилятора), кг с³ м⁶.

Q_1, Q_2 — расход воздуха по шахте и через надшахтное здание после включения воздушной завесы, м³/с;

ρ — плотность воздуха, кг м⁻³;

α — угол между направлением воздушной завесы и плоскостью поперечного сечения ствола при встречном направлении воздушной завесы и воздушного потока внешних утечек, градус.

Для проверки возможности использования воздушной завесы как средства борьбы с внешними утечками была создана модель, схема которой изображена на рис. 8.17.

На базе проведенных исследований (рис. 8.18) установлена эмпирическая зависимость между коэффициентом перераспределения воздуха и отношением расходов воздуха внешних утечек воздушной завесы

$$m = 0,188 + \frac{Q_{ут}}{k}, \quad (8.38)$$

где

$$k = \frac{k_0}{k_p};$$

$k_0 = \frac{Q_1}{Q_2}$ — коэффициент распределения воздуха до включения воздушной завесы (Q_1, Q_2 — расход воздуха до включения воздушной завесы по направлению прохождения Q_1 и Q_2);

$k_p = \frac{Q_1}{Q_1}$ — коэффициент распределения после включения воздушной завесы;

$$m = \frac{Q_1}{Q_m}.$$

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что воздушная завеса может быть эффективным средством снижения подсосов воздуха через надшахтные здания.

9 ОСНОВЫ РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ДИСПЕТЧЕРСКОМ И АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ

9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основными задачами диспетчерского и автоматического контроля и управления проветриванием шахт и рудников являются повышение эффективности использования подаваемого в шахту воздуха, повышение безопасности труда за счет исключения возможности опасного загазовывания горных выработок при наличии оперативного контроля и управления проветриванием, повышение надежности вентиляции шахт и рудников. Успешное решение общих задач распадается на ряд конкретных, среди которых:

определение величин фактических выделений вредных в атмосферу горных выработок и прогнозирование возможного диапазона их колебаний;

расчет потребных расходов воздуха для проветривания сети горных выработок по фактору вредных в (здесь и ниже под вредностями для краткости понимается выделение горючих, взрывчатых и ядовитых газов или пыли);

расчет параметров регулирования, требуемых для достижения заданной (нормируемой) газовой или санитарно-гигиенической обстановки, изменений расходов воздуха, необходимых для такого распределения расходов воздуха параметров сети (аэродинамических сопротивлений) и, наконец, требуемых изменений аэродинамических параметров исполнительных органов регуляторов.

В зависимости от типа и характеристики применяемых исполнительных органов регуляторов может потребоваться расчет регулирующих (управляющих) воздействий (так, например, подсчет величины угловых или линейных перемещений регулирующего органа для обеспечения требуемого расчетного изменения аэродинамического сопротивления при отрицательном способе регулирования).

Решение упомянутых выше конкретных задач применительно к диспетчерскому и автоматическому регулированию базируется на общих положениях рудничной аэрологии.

Так, например, в основу расчета расхода воздуха для проветривания сети выработок по величине выделений вредных

положена общепринятая методика, основные положения которой изложены выше в пункте 2.1 (Расчет расхода воздуха для проветривания шахт по газовому фактору).

Расчет потребных изменений аэродинамических сопротивлений участков сети горных выработок для сложных соединений достаточно полно изложен выше в главах 2 и 4. Однако даже при наличии математического аппарата для расчета соединений в конкретных случаях решения поставленных задач диспетчерского и автоматического управления проветриванием возникает имеющий существенное практическое значение вопрос, как решить поставленную задачу при минимуме информации о сети.

Рост объема информации о сети при специфических условиях эксплуатации и малой надежности телемеханических систем в шахтных условиях крайне нежелателен ввиду повышения стоимости больших систем, снижения их надежности и оперативности. В связи с этим ниже сделана попытка дать математическое описание и изложить основы расчета вентиляционных сетей с учетом их взаимосвязанности при регулировании, обосновать методику расчета оптимального управления воздухораспределением при регулировании проветривания шахт, а также обосновать методику и порядок сбора и обработки информации об аэродинамических параметрах сети, не требующую создания специальных датчиков величины аэродинамического сопротивления вентиляционной сети и отдельных ее участков. Последнее обстоятельство представляется весьма существенным, так как в настоящее время аэродинамическое сопротивление горной выработки может быть определено только косвенно — по величине перепада давления на продвижение воздуха по горной выработке (или участку ее) и расходу воздуха. Не говоря уже о росте объема необходимой информации, такой метод приводит к увеличению объема расчетных работ и снижению надежности исходной информации для регулирования, поскольку ошибка в определении расхода воздуха входит в квадрате в выражение для расчета аэродинамического сопротивления выработки (или ее участка).

9.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА В СЛОЖНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Необходимость исследования закономерностей изменения расхода воздуха в ветвях вентиляционных сетей шахт вытекает из давно назревшей практической потребности в изучено обоснованной методике расчета величины регулируемых аэродинамических сопротивлений в отдельных ветвях сети, обеспечивающих потребное воздухораспределение по сети в целом. Однако современный математический аппарат не позволяет решить этот вопрос чисто аналитически даже для такой простейшей модели реальной вен-

тиляционной сети, как однодиагональное вентиляционное соединение. Поэтому ниже дано математическое моделирование процессов отрицательного регулирования в ветвях простого диагонального, многодиагонального и объемного соединений. При этом воздухораспределении определялись итерационным методом Ньютона для ряда последовательно нарастающих значений регулируемого сопротивления одной из ветвей и неизменных сопротивлений остальных ветвей.

В качестве первых приближений значений расходов по ветвям сети использовались приближенные воздухораспределения, найденные с помощью эквивалентных преобразований n -угольника

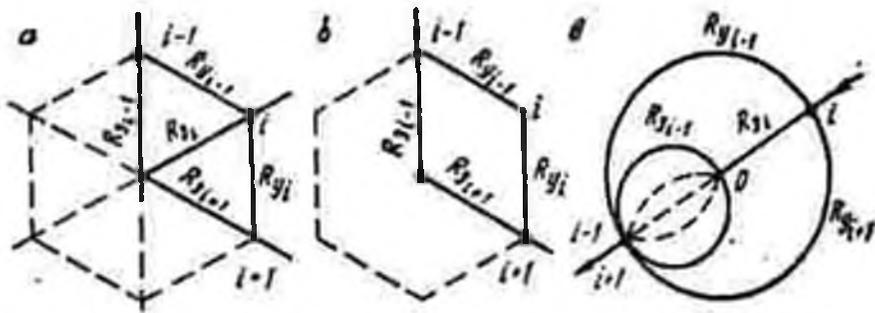


Рис. 9.1. Последовательность эквивалентных преобразований n -угольника в радиально-лучевую звезду и обратно

эквивалентных сопротивлений в n -лучевую звезду и обратных, полученных на основе следующих рассуждений:

1. Если приведенный на рис. 9.1, а n -угольник сопротивлений R_{y_i} (где n — любое число узлов, а i — текущий номер узла) эквивалентен соответствующей n -лучевой звезде сопротивлений R_{y_i} , то обе эти фигуры оказывают равное сопротивление прохождению через них воздуха в любом направлении для любого из возможных режимов притыкающей к узлам фигур и не подвергаемой эквивалентным преобразованиям остальной части вентиляционной сети. В частности, при условии отсутствия расходов по ветвям, исходящим из всех узлов данных фигур, кроме любых двух узлов [например, $(i-1)$ -го и i -го, i -го и $(i+1)$ -го, $(i-1)$ -го и $(i+1)$ -го], должны соблюдаться следующие соотношения между сопротивлениями эквивалентных фигур (рис. 9.1, б):

$$R_{y_{i-1}} + R_{y_i} = \frac{R_{y_{i-1}} \left(\sum_{j=1}^n R_{y_j} - R_{y_{i-1}} \right)}{\left(\sqrt{R_{y_{i-1}}} + \sqrt{\sum_{j=1}^n R_{y_j} - R_{y_{i-1}}} \right)^2} = A; \quad (9.1)$$

$$R_{2l-1} + R_{2l+1} = \frac{(R_{7l} + R_{7l-1}) \left[\sum_{j=1}^n R_{7j} - (R_{7l} + R_{7l-1}) \right]}{\left[\sqrt{R_{7l} + R_{7l-1}} + \sqrt{\sum_{j=1}^n R_{7j} - (R_{7l} + R_{7l-1})} \right]^2} = C; \quad (9.2)$$

$$R_{2l+2} + R_{2l} = \frac{R_{7l} \left(\sum_{j=1}^n R_{7j} - R_{7l} \right)}{\left(\sqrt{R_{7l}} + \sqrt{\sum_{j=1}^n R_{7j} - R_{7l}} \right)^2} = B. \quad (9.3)$$

Сложив (9.1) и (9.3) и вычтя (9.2), получим для любых l и l :

$$R_{7l} = \frac{1}{2} |A + B - C|. \quad (9.4)$$

2. Если давления во всех узлах эквивалентных фигур равны, кроме давления в одном любом узле (например, l -м), то можно условно совместить все узлы равного давления. При этом образуется параллельное соединение примыкающих к этому l -му узлу двух сторон n -угольника, сопротивление которого должно быть равно сопротивлению образовавшегося смешанного соединения лучей n -звезды (рис. 9.1, а). Получающиеся при этом соотношения удобно выразить с помощью пропускных способностей соответствующих элементов эквивалентных фигур:

$$\frac{1}{\sqrt{R_{7l-1}}} + \frac{1}{\sqrt{R_{7l}}} = \frac{K_{2l} \left(\sum_{j=1}^n K_{2j} - K_{2l} \right)}{\sqrt{K_{2l}^2 + \left(\sum_{j=1}^n K_{2j} - K_{2l} \right)^2}} = D; \quad (9.5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{R_{7l}}} + \frac{1}{\sqrt{R_{7l+1}}} = \frac{K_{2l+1} \left(\sum_{j=1}^n K_{2j} - K_{2l+1} \right)}{\sqrt{K_{2l+1}^2 + \left(\sum_{j=1}^n K_{2j} - K_{2l+1} \right)^2}} = E; \quad (9.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{R_{7l-1}}} + \frac{1}{\sqrt{R_{7l+1}}} = \\ & = \frac{(K_{2l} + K_{2l+1}) \left[\sum_{j=1}^n K_{2j} - (K_{2l} + K_{2l+1}) \right]}{\sqrt{(K_{2l} + K_{2l+1})^2 + \left[\sum_{j=1}^n K_{2j} - (K_{2l} + K_{2l+1}) \right]^2}} = F. \quad (9.7) \end{aligned}$$

где

$$K_{s_i} = \frac{1}{\sqrt{R_{s_i}}}; \quad K_{s_{i+1}} = \frac{1}{\sqrt{R_{s_{i+1}}}}; \quad \sum_{i=1}^n K_{s_i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{R_{s_i}}}$$

Сложив (9.5) и (9.6) и вычтя (9.7), получим после преобразований для любых i и n

$$R_{s_i} = \frac{4}{(D+E-F)^2} \quad (9.8)$$

При $n = 3$ формулы (9.4) и (9.8) совпадают соответственно с известными формулами для эквивалентных преобразований

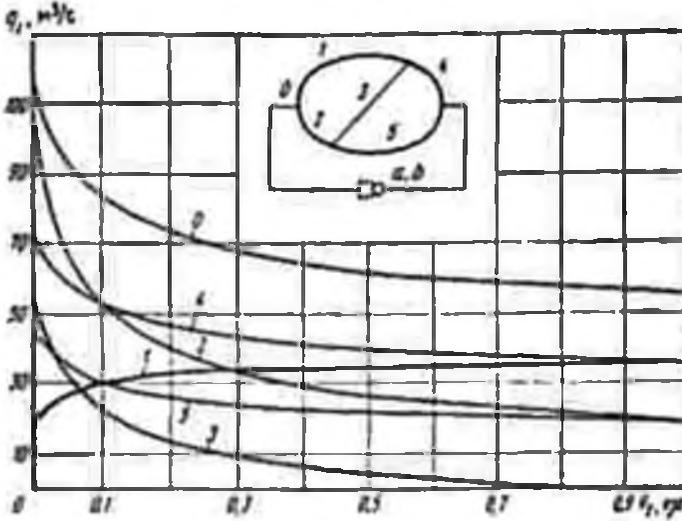


Рис. 9.3. Зависимость расхода воздуха ветвей однодиагонального соединения от регулируемого гидродинамического сопротивления одной из ветвей

(Параметры схемы: $R_1 = 0,3$ см; $R_2 = 1$ см; $R_3 = 0,02$ см; $R_4 = 0,02$ см; $R_5 = 0,1$ см; $R_6 = 0 = 0,02$ см; $n = 100$ лгс/м³)

треугольника аэродинамических сопротивлений в трехлучевую звезду и обратных. С увеличением числа узлов преобразуемых фигур погрешность эквивалентных преобразований резко снижается. Если для $n = 3$ погрешность может достигать в отдельных случаях 10% , то уже при $n = 4$ не превышает 5% . Это обстоятельство позволило значительно сократить число требуемых итераций для достижения заданной точности расчета воздухораспределений моделируемых соединений за счет более высокой степени точности первых приближений воздухораспределений, найденных для $n > 4$ с помощью полученных формул (9.4) и (9.8) по сравнению с найденными по формулам для $n = 3$.

На рис. 9.2—9.4 приведены графики полученных на математической модели зависимостей расходов ветвей однодиагонального,

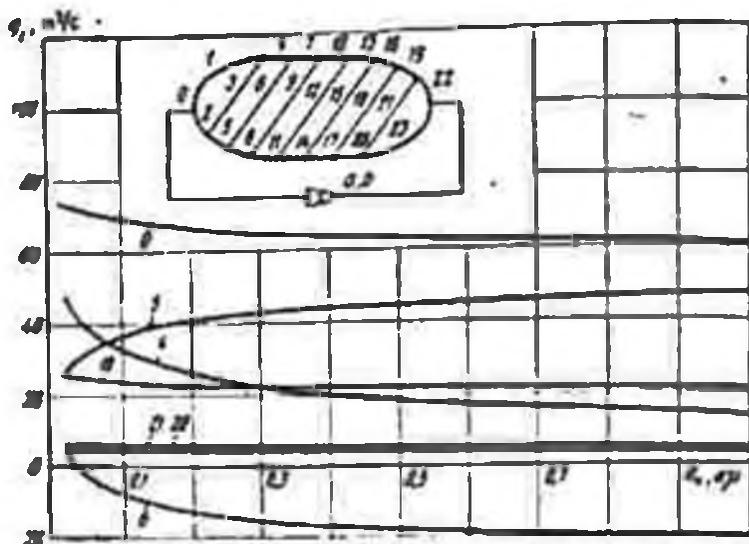


Рис. 2.3. Зависимость распределения воздуха шнуровидного соединения от регулирования скорости сжатия воздуха одной из ветвей

(Параметры схемы: $R_1 = R_{11} = R_{12} = 0,01$ км; $R_4 = \text{var}$; $R_5 = R_6 = R_7 = 0,02$ км; $R_8 = R_{10} = 0,06$ км; $R_9 = R_8 = R_7 = 0,02$ км; $N_1 = 0,07$ км; $N_{11} = R_{11} = R_{12} = 0,04$ км; $R_{13} = R_{14} = 0,04$ км; $N_2 = N_{11} = R_{11} = 0,06$ км; $N_3 = 0 = 0,02$ км; $\sigma = 500$ кгс/м²)

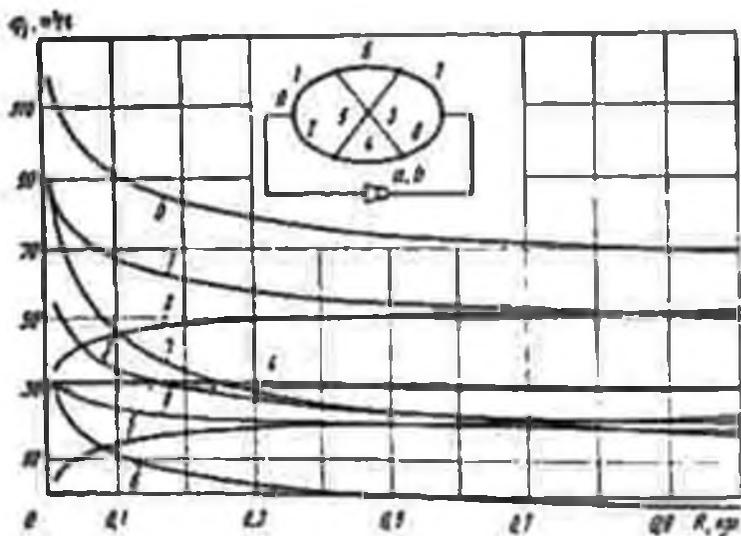


Рис. 2.4. Зависимости распределения воздуха объемного соединения от регулирования скорости сжатия воздуха одной из ветвей

(Параметры схемы: $N_1 = \text{var}$; $R_1 = 0,1$ км; $R_2 = 0,03$ км; $R_3 = 0,04$ км; $R_4 = 0,05$ км; $R_5 = 0,06$ км; $R_6 = 0,02$ км; $R_7 = 0,2$ км; $R_8 = 0 = 0,02$ км; $\sigma = 500$ кгс/м²)

семидиагонального и объемного вентиляционных соединений при отрицательном регулировании в одной из ветвей. Аналитическая обработка этих односторонних зависимостей показала, что расход в любой i -й нерегулируемой ветви (с постоянным сопротивлением) зависит от регулируемого сопротивления R_j j -й регулируемой ветви по закону

$$q_i = q_{i_0} + \frac{a_i}{(\beta + R_j)^{c_i}}, \quad (9.9)$$

где q_{i_0} — расход i -й ветви при $R_j = \infty$;

a_i, c_i — некоторые константы, присущие только ветви,

β — некоторый постоянный параметр регулирования в j -й ветви, присущий всем ветвям данного соединения.

Расход в самой регулируемой ветви q_j зависит от ее сопротивления по закону

$$q_j = \frac{a_j}{(\beta + R_j)^{c_j}}, \quad (9.10)$$

где a_j, c_j — некоторые константы, присущие только ветви.

Отсутствие члена q_{j_0} объясняется тем, что при бесконечном сопротивлении ветви расход в ней отсутствует.

Исключив скобку $(\beta + R_j)$ из (9.9) и (9.10), получим зависимость расхода любой нерегулируемой ветви от расхода регулируемой ветви:

$$q_i = q_{i_0} + A_i q_j^{D_i}, \quad (9.11)$$

где

$$A_i = \frac{a_i}{a_j^{c_i}}; \quad D_i = \frac{c_i}{c_j}.$$

Найти последние две константы несложно, если в данном процессе перехода регулируемого сопротивления R_j от значения, равного 0, до значения, равного ∞ , найдется при таких значениях R_j , при которых данное соединение автоматически упрощается до поддающегося аналитическому расчету классическими методами теории вентиляции. В частности, при отрицательном регулировании в одной из боковых ветвей однодиагонального соединения (рис. 9.5), не подверженных реверсу, такие значения R_j (где $j = 1, 2, 4, 5$) очевидны.

при $R_j = 0$:

$$q_j = q_{j_0} = \frac{a_j}{\beta^{c_j}}; \quad (9.12)$$

$$q_i = q_{i_0} = q_{i_0} + \frac{a_i}{\beta^{c_i}}; \quad (9.13)$$

при $R_l = \infty$:

$$q_i = q_{i_m}; \quad q_j = q_{j_m} = 0;$$

при $R_l = R_{lp}$:

$$q_i = q_{ip} = q_{i_m} + \frac{\alpha_i}{(R_{lp} + \beta)^{\epsilon_i}} \quad (9.14)$$

$$q_j = q_{jp} = \frac{\alpha_j}{(R_{lp} + \beta)^{\epsilon_j}}, \quad (9.15)$$

где q_{i_m} , q_{j_m} — значения расходов i -й и j -й ветвей в момент реверса в диагонали 3;

R_{lp} — значение регулируемого сопротивления j -й ветви, при котором выполняется условие реверса в диагонали 3.

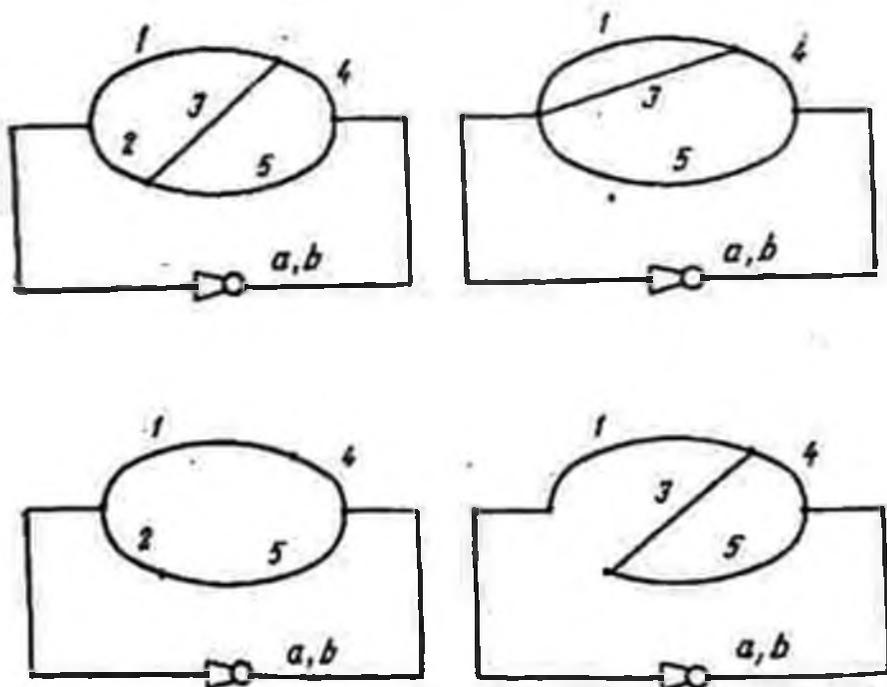


Рис. 9.6. Схемы трансформации сети в расчету аналитическим методом сферических редуктов при регулируемом сопротивлении в однонаправленном состоянии (при $R = \infty$)

Поделив преобразованные выражения (9.12) и (9.13) соответственно на (9.14) и (9.15), получим:

$$\frac{q_{i_m} - q_{i_m}}{q_{ip} - q_{i_m}} = \left(1 + \frac{R_{lp}}{\beta}\right)^{\epsilon_i}; \quad (9.16)$$

$$\frac{q_{j_m}}{q_{jp}} = \left(1 + \frac{R_{lp}}{\beta}\right)^{\epsilon_j} \quad (9.17)$$

Исключив скобку $(1 + \frac{R_{ip}}{\beta})$ из (9.16) и (9.17), получим

$$D_i = \frac{c_i}{c_j} = \ln \frac{q_{i_0} - q_{i_m}}{q_{i_p} - q_{i_m}} \Big| \ln \frac{q_{i_0}}{q_{i_p}}. \quad (9.18)$$

Исключив параметр β из (9.12) и (9.13), получим

$$A_j = \frac{\alpha_j}{\alpha_j'} = \frac{q_{i_0} - q_{i_m}}{q_{i_0}^{D_j}}. \quad (9.19)$$

Подставив (9.18) и (9.19) в (9.11), получим окончательно

$$q_i = q_{i_m} + (q_{i_0} - q_{i_m}) \left(\frac{q_j}{q_{j_0}} \right)^{\ln \frac{q_{i_0} - q_{i_m}}{q_{i_p} - q_{i_m}} \Big| \ln \frac{q_{i_0}}{q_{i_p}}} \quad (9.20)$$

Последнее уравнение взаимосвязанности расходов i -й и j -й ветвей дает возможность определить значение расхода любой нерегулируемой ветви однонаправленного соединения по известному расходу регулируемой ветви, даже если конкретное значение регулируемого сопротивления R_j при этом неизвестно.

Для определения параметра β используем следующий искусственный прием. Запишем выражение (9.10) для некоторых трех значений регулируемого сопротивления R_{j_1} , R_{j_2} и R_{j_3} и составим следующие соотношения соответствующих расходов:

$$\frac{q_{i_1}}{q_{i_2}} = \left(\frac{\beta + R_{j_2}}{\beta + R_{j_1}} \right)^{c_i}; \quad (9.21)$$

$$\frac{q_{i_2}}{q_{i_3}} = \left(\frac{\beta + R_{j_3}}{\beta + R_{j_2}} \right)^{c_i}. \quad (9.22)$$

Равенство левых частей последних уравнений означает, что

$$q_{i_1} = \sqrt{q_{i_2} q_{i_3}} \quad (9.23)$$

и возможно, если

$$\beta = \frac{R_{j_1}^2 - R_{j_1} R_{j_2}}{R_{j_1} + R_{j_2} - 2R_{j_3}}. \quad (9.24)$$

Таким образом, если в ходе отрицательного регулирования зафиксировать три значения расхода регулируемой ветви, связанные соотношением (9.23), то, согласно (9.24), можно найти параметр α по трем соответствующим значениям регулируемого сопротивления.

Если далее для однодиагонального соединения выбрать $R_{11} = R_{10} = 0$, $R_{12} = R_{1p}$, а в качестве R_{12} — некоторое промежуточное R'_1 (значение которого мы определим ниже), то выражение (9.24) упростится:

$$\beta = \frac{(R'_1)^2}{R_{1p} - 2R'_1}. \quad (9.25)$$

При этом нулевому и реверсному значениям регулируемого сопротивления R_{10} и R_{1p} соответствуют легко определяемые аналитически значения расхода регулируемой ветви q_{10} и q_{1p} , а промежуточное значение этого расхода q'_1 равно по определению

$$q'_1 = \sqrt{q_{10}q_{1p}}. \quad (9.26)$$

Соответствующие этому значению расхода регулируемой ветви значения q'_1 расходов нерегулируемых ветвей можно определить по формуле (9.20), после чего промежуточное значение регулируемого сопротивления R'_1 определится из уравнения, составленного по второму закону сетей для любого контура, содержащего регулируемую ветвь.

Следуя вышесказанному алгоритму, определим, например, все параметры переходных уравнений (9.9) и (9.10) для ветвей однодиагонального соединения (см. рис. 9.2), если в качестве регулируемой выбрана ветвь 2, а напорная характеристика работающего на соединение вентилятора описывается уравнением

$$H_d = a - bq_d^2. \quad (9.27)$$

где q_d — общий расход однодиагонального соединения, м³/с;
 H_d — общая депрессия диагонального соединения, кгс/м²;
 a — напор вентилятора, кгс/м²;
 b — внутреннее аэродинамическое сопротивление вентилятора, кр.

Если выразить расходы ветвей соединения через постоянные параметры вентилятора a и b и постоянные сопротивления нерегулируемых ветвей R_1 во всех трех режимах регулируемого сопротивления R_2 , при которых схема становится аналитически определяемой, то в общем случае можно прийти к следующим выражениям:

$$q_{10} = K_{10} \sqrt{a} \text{ при } R_2 = 0;$$

$$q_{1p} = K_{1p} \sqrt{a} \text{ при } R_2 = R_{2p} = \frac{R_1 R_2}{R_4};$$

$$q_{1\infty} = K_{1\infty} \sqrt{a} \text{ при } R_2 = \infty,$$

где K_{10} , K_{1p} , $K_{1\infty}$ — значения условной пропускной способности ветвей соединения в соответствующих режимах регулируемого R_1 , равные соответственно:

$$K_{20} = \frac{1}{\sqrt{b + \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_2}} + \sqrt{R_1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}}\right)^2}}\right)^2}}};$$

$$K_{40} = \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{R_2} + \sqrt{R_1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}}\right)^2}}} K_{20}; \quad K_{4p} = K_{20} - K_{40};$$

$$K_{60} = \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R_2} + \sqrt{R_1}} K_{40}; \quad K_{6p} = K_{40} - K_{60}; \quad K_{6\infty} = K_{20} + K_{60};$$

$$K_{2p} = \frac{1}{\sqrt{b + \frac{R_1(R_1 + R_2)}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2}}}; \quad K_{4p} = K_{1p} = \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2}} K_{2p};$$

$$K_{20} = K_{60} = K_{2p} - K_{6p}; \quad K_{2p} = 0; \quad K_{2\infty} = 0;$$

$$K_{2\infty} - K_{3\infty} = \frac{1}{\sqrt{b + R_1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2 + R_1}}\right)^2}}};$$

$$K_{3\infty} = -K_{2\infty} = \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2 + R_1}} K_{2\infty}; \quad (9.28)$$

$$K_{30} = K_{20} - K_{3\infty}.$$

Подставив q_{2p} и $q_{2\infty}$ из системы (9.28) и (9.26), получим выражение промежуточного значения q_2 через напор вентилятора и соответствующие значения условной пропускной способности ветви 2:

$$q_2 = \sqrt{a} \sqrt{K_2 K_{2p}}. \quad (9.29)$$

Расход в ветви 5 выразится через расход регулируемой ветви 2 согласно (9.20) с учетом (9.28) следующим уравнением:

$$q_5 = \sqrt{a} \left[K_{3\infty} + (K_{30} - K_{3\infty}) \left(\frac{q_2}{\sqrt{a} K_{20}} \right)^{\ln \frac{K_{2p} - K_{2\infty}}{K_{2p} - K_{20}}} \right]^{\ln \frac{K_{20}}{K_{2p}}}. \quad (9.30)$$

Аналогично общий расход диагонального соединения как функция расхода регулируемой ветви 2 выразится уравнением

$$q_2 = \sqrt{a} \left[K_{2m} + (K_{2b} - K_{2m}) \left(\frac{K_{2b}}{K_{2p}} \right)^{\ln \frac{K_{2b} - K_{2m}}{K_{2p} - K_{2m}} / \ln \frac{K_{2b}}{K_{2p}}} \right]. \quad (9.31)$$

Подставив (9.29) в (9.30) и (9.31), получим соответствующие промежуточные значения расходов q'_5 и q'_2 :

$$q'_5 = \sqrt{a} \left[K_{5m} + (K_{5b} - K_{5m}) \left(\frac{K_{5p}}{K_{5b}} \right)^{\ln \frac{K_{5b} - K_{5m}}{K_{5p} - K_{5m}} / \ln \frac{K_{5b}}{K_{5p}}} \right]; \quad (9.32)$$

$$q'_2 = \sqrt{a} \left[K_{2m} + (K_{2b} - K_{2m}) \left(\frac{K_{2p}}{K_{2b}} \right)^{\ln \frac{K_{2b} - K_{2m}}{K_{2p} - K_{2m}} / \ln \frac{K_{2b}}{K_{2p}}} \right]. \quad (9.33)$$

Для промежуточного значения регулируемого сопротивления R'_2 справедливо следующее соотношение, вытекающее из второго закона сетей применительно к рассматриваемой схеме:

$$R'_2 = \frac{a - (q'_2)^2 b - (q'_5)^2 R_5}{(q'_2)^2}. \quad (9.34)$$

Подставив (9.32) и (9.33) в (9.34), получим выражение промежуточного значения регулируемого сопротивления R'_2 через соответствующие значения условных пропускных способностей K_2 и K_5 нерегулируемых ветвей 2 и 5 и соответствующие значения общей пропускной способности соединения K_d :

$$R'_2 = \frac{1}{K_{2b} K_{2p}} \left\{ 1 - \left[K_{2m} + (K_{2b} - K_{2m}) \left(\frac{K_{2p}}{K_{2b}} \right)^{\ln \frac{K_{2b} - K_{2m}}{K_{2p} - K_{2m}} / \ln \frac{K_{2b}}{K_{2p}}} \right]^2 b - \left[K_{5m} + (K_{5b} - K_{5m}) \left(\frac{K_{5p}}{K_{5b}} \right)^{\ln \frac{K_{5b} - K_{5m}}{K_{5p} - K_{5m}} / \ln \frac{K_{5b}}{K_{5p}}} \right]^2 R_5 \right\}. \quad (9.35)$$

Подставив вычисленное таким образом значение R'_2 в формулу (9.25), определяем параметр β , после чего определить все остальные константы уравнений (9.9) и (9.10) для любой ветви несложно.

Подставив соответствующие выражения из (9.26), (9.16) и (9.17), получим:

$$c_1 = \frac{\ln \frac{K_{1g} - K_{1m}}{K_{1p} - K_{1m}}}{\ln \left(1 - \frac{R_{2p}}{\beta}\right)}; \quad (9.36)$$

$$c_1 = c_2 = \frac{\ln \frac{K_{2g}}{K_{2p}}}{\ln \left(1 - \frac{R_{2p}}{\beta}\right)}. \quad (9.37)$$

Подставив (9.36), (9.37) и соответствующие выражения из (9.28) в (9.12) и (9.13), получим:

$$\alpha_1 = \sqrt{a} (K_{1g} - K_{1m}) \beta \frac{\ln \frac{K_{1g} - K_{1m}}{K_{1p} - K_{1m}}}{\ln \left(1 - \frac{R_{2p}}{\beta}\right)}; \quad (9.38)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 = \sqrt{a} K_{2g} \beta \frac{\ln \frac{K_{2g}}{K_{2p}}}{\ln \left(1 - \frac{R_{2p}}{\beta}\right)}. \quad (9.39)$$

Подставив (9.36) и (9.38) в (9.9), а (9.37) и (9.39) в (9.10), получим зависимости расходов ветвей однодиагонального соединения от сопротивления регулируемой ветви R_2 .

$$q_i = \sqrt{a} \left[K_{1m} + \frac{K_{1g} - K_{1m}}{\left(1 + \frac{R_1}{\beta}\right) \frac{\ln \frac{K_{1g} - K_{1m}}{K_{1p} - K_{1m}}}{\ln \left(1 - \frac{R_{2p}}{\beta}\right)}} \right]; \quad (9.40)$$

$$q_i = q_1 = \sqrt{a} \frac{K_{2g}}{\left(1 + \frac{R_1}{\beta}\right) \frac{\ln \frac{K_{2g}}{K_{2p}}}{\ln \left(1 - \frac{R_{2p}}{\beta}\right)}}. \quad (9.41)$$

Из сравнения выражений (9.28) и (9.40), видно что условная пропускная способность любой i -й ветви однодиагонального соединения (где $i = 1, 2, 3, 4, 5$ и q) зависит от сопротивления регулируемой ветви R_2 по формуле

$$K_i = K_{1m} + (K_{1g} - K_{1m}) \left(1 + \frac{R_1}{\beta}\right) \frac{\ln \frac{K_{1g} - K_{1m}}{K_{1p} - K_{1m}}}{\ln \left(1 - \frac{R_{2p}}{\beta}\right)}. \quad (9.42)$$

Таким образом, последние уравнения позволяют аналитически рассчитать воздухораспределение в однодиагональном соединении при любых значениях параметров вентилятора и сопротивлений

соединения, поскольку любая комбинация сопротивлений ветвей может выступать как промежуточная в процессе условного отрицательного регулирования в одной из боковых ветвей при постоянных сопротивлениях остальных ветвей и постоянных параметрах вентилятора

Из уравнения (9.27), связывающего параметры вентилятора и параметры вентиляционного соединения видно, что обшая депрессия соединения может считаться постоянной ($ff_2 = a = \text{const}$), если внутренним сопротивлением вентилятора можно пренебречь ($b = 0$). В этом частном случае выражения (9.28) для условных пропускных способностей упростятся и примут вид:

$$\begin{aligned}
 K_{c_1} &= \frac{\sqrt{R_2} + \sqrt{R_1 + \frac{R_1 R_2}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2}}}{\sqrt{R_1 \left[R_1 + \frac{R_1 R_2}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2} \right]}}; \quad K_{c_0} = \frac{\sqrt{R_2} + \sqrt{R_1}}{\sqrt{R_2 (R_1 + R_2)}}; \\
 K_{c_2} &= K_{1_2} = \frac{1}{\sqrt{R_1 + \frac{R_1 (R_2 + R_3)}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2} + \sqrt{R_3})^2}}}; \\
 K_{1_1} &= \frac{1}{\sqrt{\frac{R_2}{R_3} (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2 + R_2}}; \\
 K_{1_p} &= K_{1_0} = \frac{1}{\sqrt{R_1 + R_2}}; \\
 K_{2_1} &= \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1}{R_3} (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2 + R_2}}; \quad (9.43) \\
 K_{2_p} &= K_{2_0} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2 (R_1 + R_2)}}; \quad K_{2_2} = K_{2_0} = 0; \quad K_{2_3} = \frac{1}{\sqrt{R_2}}; \\
 K_{3_0} &= \frac{1}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1} (\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2 + R_2}}; \\
 K_{3_2} &= K_{3_1} = \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1}{R_2} (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2} + \sqrt{R_3})^2 + R_2 + R_3}}; \\
 K_{4_0} &= \frac{1}{\sqrt{R_1 + \frac{R_1 R_2}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2}}}; \\
 K_{4_2} &= \frac{1}{\sqrt{\frac{R_1}{R_2 + R_3} (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2} + \sqrt{R_3})^2 + R_1}}.
 \end{aligned}$$

Упростится также и выражение (9.35) для расчета промежуточного значения регулируемого сопротивления R_2 :

$$R_2 = \frac{1}{K_{2p}K_{2z}} \left\{ 1 - R_1 \left[K_{2z} + (K_{1z} - K_{1z'}) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\frac{K_{2p}}{K_{2z}} \right)^{\ln \frac{K_{2z} - K_{1z'}}{K_{2p} - K_{2z}}} / \ln \frac{K_{2z}}{K_{1p}} \right] \right\}. \quad (9.44)$$

Уравнение (9.40), записанное для общего расхода соединения q_A , примет в этом случае вид

$$q_A = \sqrt{a} \left[K_{2z} + \frac{K_{2z} - K_{2z'}}{\left(1 + \frac{R_2}{\beta} \right)^{\ln \frac{K_{2z} - K_{2z'}}{K_{2p} - K_{2z}}} / \ln \left(1 + \frac{K_{2z}}{\beta} \right)} \right]. \quad (9.45)$$

Поскольку для соединения в целом при этом справедливо выражение

$$H_A = a = q_A^2 R_A, \quad (9.46)$$

то, подставив (9.45) в (9.46), получим следующую зависимость общего сопротивления однодиагонального соединения R_A от регулируемого сопротивления его боковой ветви 2:

$$R_A = \frac{1}{\left[K_{2z} + \frac{K_{2z} - K_{2z'}}{\left(1 + \frac{R_2}{\beta} \right)^{\ln \frac{K_{2z} - K_{2z'}}{K_{2p} - K_{2z}}} / \ln \left(1 + \frac{K_{2z}}{\beta} \right)} \right]^2}. \quad (9.47)$$

Последнее выражение позволяет аналитически определять значение общего сопротивления однодиагонального соединения при любой комбинации сопротивлений его ветвей, поскольку такая соответствует одному из промежуточных режимов процесса условного отрицательного регулирования в одной из боковых ветвей при постоянных сопротивлениях остальных ветвей и постоянной депрессии соединения.

Таким образом, аналитический расчет воздухораспределения и общего сопротивления однодиагонального соединения методом условного отрицательного регулирования в одной из боковых ветвей сводится к определению констант переходных уравнений ветвей соединения и подстановке в них соответствующего значения сопротивления условнорегулируемой боковой ветви.

Данный метод позволяет аналитически рассчитать параметры переходных уравнений, воздушное распределение и общее сопротивление и для ряда других, более сложных вентиляционных соединений, имеющих ветви, подверженные реверсу в ходе отрицательного регулирования в одной из других ветвей.

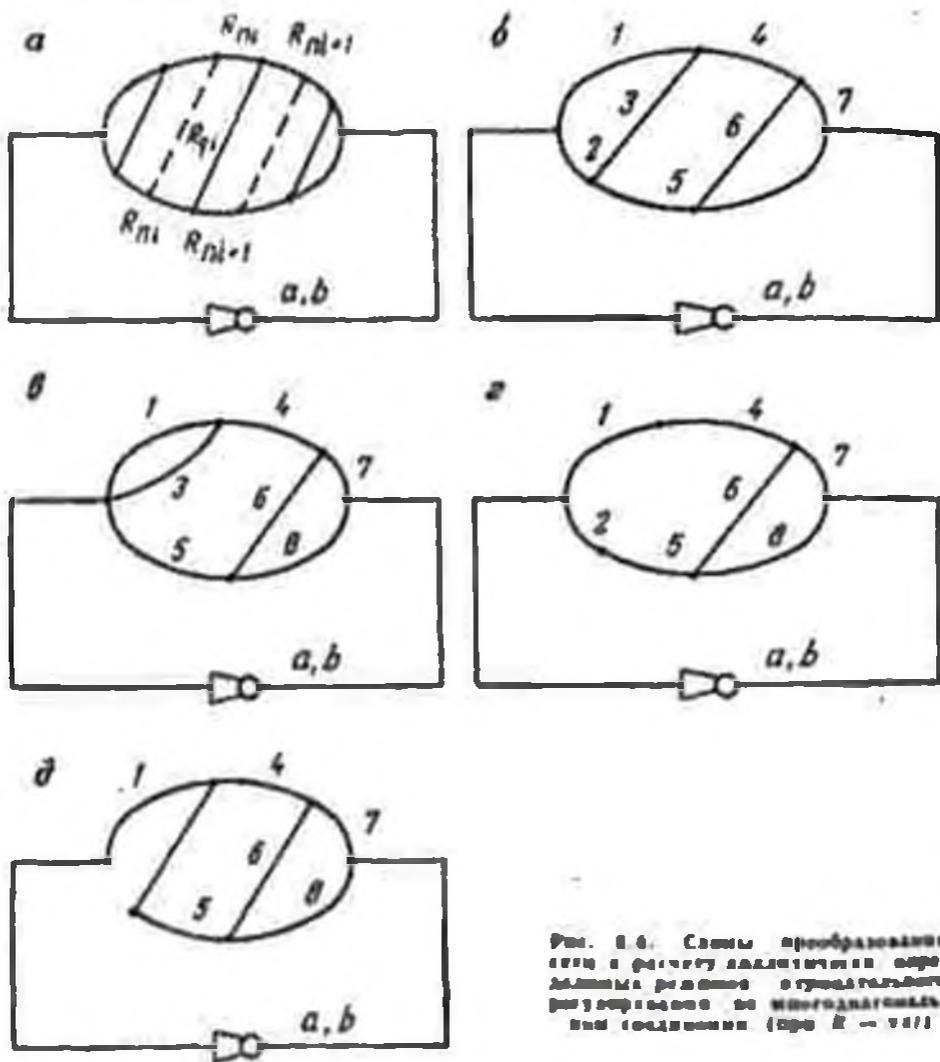


Рис. 9.6. Схемы преобразования сети в расчету аналитически определенными рядами в круглоугольного регулируемого во многодиагональном соединении (при $R = \infty$)

Так, для многодиагонального соединения (рис. 9.6, а), как известно, условием реверса в любой i -й диагонали, заключенной между i -м и $(i + 1)$ -м участками левой и правой боковых ветвей, является соотношение

$$\frac{R_{2i}}{R_{2i+1}} = \frac{R_{n_i}}{R_{n_{i+1}}}$$

В частности, для двухдиагонального соединения в диагонали J (рис. 9.6, б).

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \tag{9.48}$$

Произведя условное отрицательное регулирование (в ветви 2), получим три режима (рис. 9.6, а, 9.6, б, 9.6, в), сводящихся к однодиагональному соединению, поддающиеся аналитическому расчету согласно вышеприведенной методике. Таким образом, имеется возможность определения констант переходных уравнений вида (9.9), (9.10) и (9.11) и для двухдиагонального соединения, которое, следовательно, также поддается аналитическому расчету. Условное регулирование в трехдиагональном соединении приводит к трем режимам, сводящим его к двухдиагональному соединению, и т. д. Подобные же операции можно произвести для многодиагонального соединения с любым числом диагоналей.

На основании всего вышесказанного можно сделать вывод о принципиальной возможности аналитического расчета воздушораспределения в любом соединении, если только в ходе условного отрицательного регулирования в одной из его ветвей могут быть получены менее сложные, аналитически определяемые соединения при трех значениях сопротивления регулируемой ветви — нулевом, бесконечном и реверсном. Задача, таким образом, сводится в основном к отысканию условий упрощающего соединения реверса в одной из его ветвей, являющегося результатом условного отрицательного регулирования в другой ветви, так как два других крайних режима условнорегулируемой ветви обычно заведомо упрощают соединение до аналитически определяемого.

Так, для соединения, изображенного на рис. 9.7, а в случае реверса, например в ветви 5 (рис. 9.7, б), можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} q_7^2 R_7 &= q_7^2 R_7, \\ q_5^2 R_1 &\pm q_5^2 R_6 = q_5^2 R_1. \end{aligned} \right\} \quad (9.49)$$

Очевидны также следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_0 \frac{\sqrt{R_1 + R_2}}{\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2 + R_3}}; \\ q_2 &= q_0 \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2 + R_3}}. \end{aligned} \right\} \quad (9.50)$$

Подставив (9.50) в (9.49), получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} q_1^2 \frac{R_1 R_2}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2 + R_3})^2} &= q_1^2 R_7, \\ q_2^2 \left[\frac{R_1 R_2}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2 + R_3})^2} + R_3 \right] &= q_2^2 R_7. \end{aligned} \right\} \quad (9.51)$$

Разделив первое уравнение этой системы на второе, получим соотношение, являющееся условием реверса в ветви 5:

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_3 (\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2 + R_3})^2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (9.52)$$

Из последнего соотношения можно определить реверсное значение сопротивления условнорегулируемой ветви, например ветви 3. Два других крайних режима регулируемого R_2 , как видно из рис. 9.7, в и 9.7, г, также приводят к аналитически определяемым соединениям. Следовательно, и все соединение, изображенное на рис. 9.7, а, является аналитически определяемым.

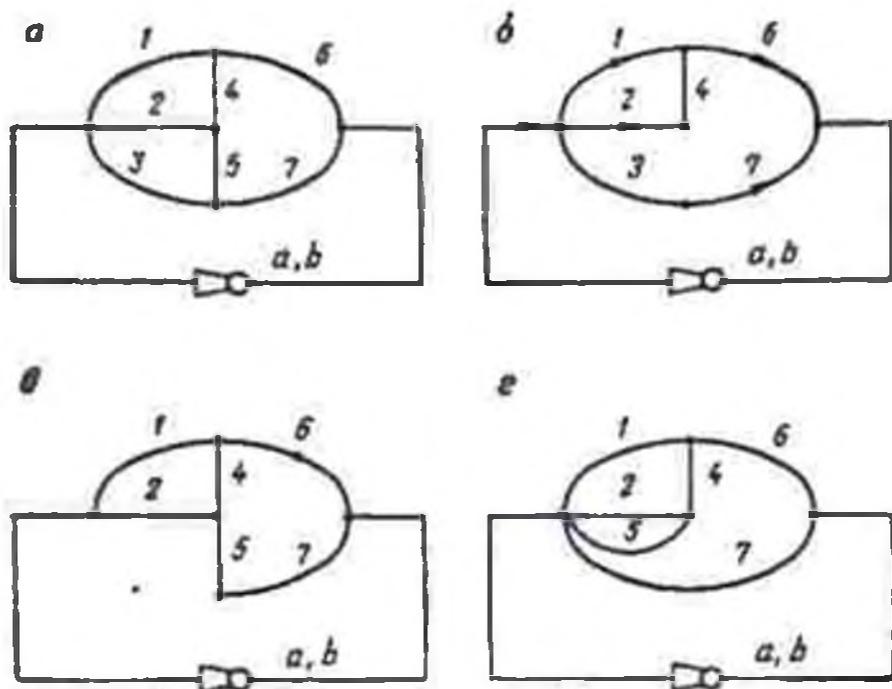


Рис. 9.7. Схемы преобразования сети в расчету аналитически определяемых режимов регулируемого объемного соединения

В заключение рассмотрим условие реверса, например в ветви 3 объемного соединения (рис. 9.8, а). Для эквивалентной схемы на рис. 9.8, б можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} q_2^2 R_3 &= q_1^2 R_3 + (q_1 + q_2)^2 R_7; \\ q_1^2 R_1 &= (q_2 + q_3)^2 R_2 + q_2^2 R_4; \\ q_2^2 R_5 &= q_2^2 R_4 + q_1^2 R_6. \end{aligned} \right\} (9.53)$$

Поделив (9.53) на q_2^2 и обозначив $\frac{q_2}{q_1} = x$, $\frac{q_1}{q_3} = y$, получим следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} x^2 R_3 &= y^2 R_3 + (y + 1)^2 R_7; \\ y^2 R_1 &= (x + 1)^2 R_2 + x^2 R_4; \\ R_5 &= x^2 R_4 + y^2 R_6. \end{aligned} \right\} (9.64)$$

Выразив из последнего уравнения системы (9 54) z^2 через y^2 и подставив его в первое уравнение, получим квадратное уравнение относительно y . Решив его, имеем

$$y_{1,2} = \frac{-R_1 R_2 \pm \sqrt{R_1 R_2 R_3 R_4 - D_1 R_1 R_2 - D_2 R_3 R_4 - D_3 R_1 R_3 - D_4 R_2 R_4}}{R_1 R_2 + R_3 R_4 + R_1 R_3} \quad (9 55)$$

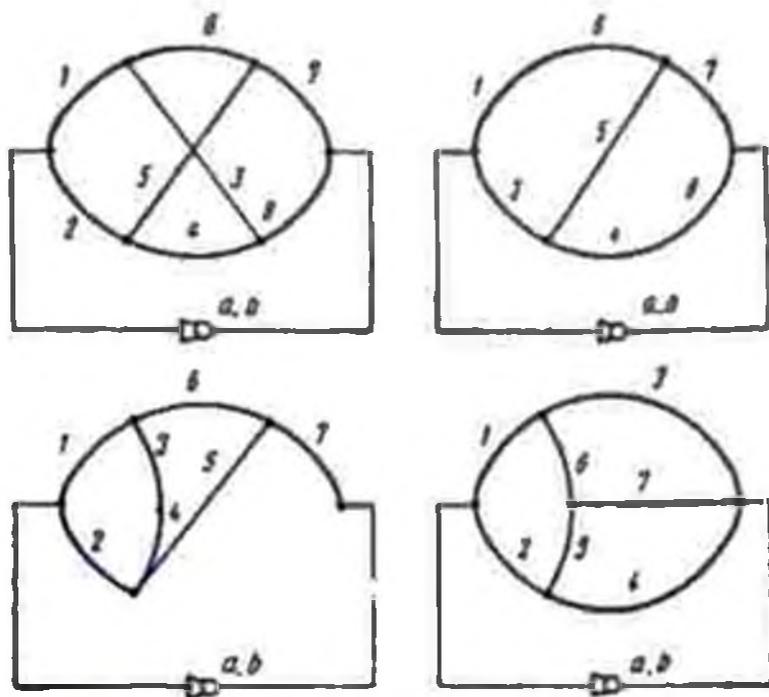


Рис. 9.8. Схемы преобразования цепи к расчету в заданном направлении (разные направления регулирования объема производства)

Выразив из последнего уравнения системы (9 54) y^2 через z^2 и подставив его во второе уравнение, получим квадратное уравнение относительно x . Решив его, имеем

$$x_{1,2} = \frac{-R_2 R_4 \pm \sqrt{R_1 R_2 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4 - R_2 R_4 R_1}}{R_1 R_4 + R_2 R_4 + R_1 R_3} \quad (9 56)$$

Выражение (9 55) не содержит R_1 и R_2 , а (9 56) — R_3 , R_4 . Это дает возможность однозначно определить реверсное значение любого из них, принятого за условно регулируемое. Если, например, условное регулирование производится в ветви 3, то из (9 56) находим значение x , затем из последнего уравнения системы (9 54) находим соответствующее этому x значение y и затем, подставив x и y в первое уравнение системы (9 54), находим искомое R_{2r} , приводящее к реверсу в ветви 3. Два других крайних режима регулируемого R_2 , как видно из рис. 9.8, б и 9.8, г, также приводят

к выше рассмотренным аналитически определенным соединениям. Следовательно, и объемное соединение является аналитически определенным предлагаемым методом условного отрицательного регулирования.

Предлагаемый метод позволяет рассчитывать аналитически воздухораспределение, общие сопротивления и переходные процессы и для целого ряда других, более сложных вентиляционных соединений. Однако громоздкость, трудоемкость и повторяемость таких расчетов выдвигает задачу создания стандартных программ расчета ряда менее сложных соединений по предлагаемому методу на ЭВМ с тем, чтобы можно было их использовать для программ расчета более сложных соединений. В этом случае полученные зависимости, а также предлагаемый на их основе метод расчета переходных процессов и воздухораспределения при отрицательном регулировании могут быть успешно применены при решении задач диспетчеризации проветривания шахт.

9.3. РАСЧЕТ ВЗАИМОСВЯЗАННОСТИ РАСХОДОВ ВОЗДУХА В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Установим закономерности, по которым изменяются расходы в ветвях с неизменяемыми аэродинамическими сопротивлениями (нерегулируемые ветви) в зависимости от расхода в ветви с регулируемым аэродинамическим сопротивлением (регулируемые ветви) при параллельном соединении рассматриваемых ветвей.

Рассмотрим параллельное соединение двух ветвей — регулируемой с сопротивлением R_p и нерегулируемой с сопротивлением R_n , на которое, как на некую условную сеть, работает вентилятор с напорной характеристикой, описываемой выражением (9.27).

Перепишем уравнение в виде

$$R_0 q_0^2 = a - b q_0^2, \quad (9.57)$$

где R_0 — общее сопротивление параллельного соединения регулируемой и нерегулируемой ветвей,

$$R_0 = \frac{R_p R_n}{(\sqrt{R_p} + \sqrt{R_n})^2}. \quad (9.58)$$

Решив полученное уравнение относительно q_0 , получим

$$q_0 = \frac{V \bar{a} (\sqrt{R_p} + \sqrt{R_n})}{\sqrt{b (\sqrt{R_p} + \sqrt{R_n})^2 + R_p R_n}}. \quad (9.59)$$

Расход в регулируемой ветви q_p составляет от общесетевого расхода q_0 часть, находимую по известному соотношению для параллельного соединения:

$$q_p = q_0 \frac{\sqrt{R_n}}{\sqrt{R_n} + \sqrt{R_p}}. \quad (9.60)$$

Подставив (9.59) в (9.60), получим

$$q_p = \frac{V_a \sqrt{R_n}}{V_b \sqrt{R_p} + \sqrt{R_n}^2 + R_p R_n} \quad (9.61)$$

Решая уравнение (9.61) относительно $\sqrt{R_p}$ и отбрасывая не имеющее физического смысла отрицательное решение, можем записать

$$\sqrt{R_p} = \frac{\sqrt{R_n}}{q_p (b + R_n)} [V_a (b + R_n) - b R_n q_p^2 - b q_p].$$

Из условия равенства депрессий регулируемой и нерегулируемой ветвей

$$q_n = q_p \frac{\sqrt{R_p}}{\sqrt{R_n}} \quad (9.62)$$

Подставив (9.61) в (9.62), получим

$$q_n = V \sqrt{\frac{a}{b + R_n}} \sqrt{1 - \left[\frac{q_p}{V_a \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{R_n} \right)} \right]^2} - \frac{b}{b + R_n} q_p \quad (9.63)$$

Выражение (9.63) можно представить в виде

$$q_n = Q_f(q_p) - m q_p \quad (9.64)$$

где

$$f(q_p) = \sqrt{1 - \left[\frac{q_p}{V_a \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{R_n} \right)} \right]^2};$$

$$Q_n = V \sqrt{\frac{a}{b + R_n}}; \quad m = \frac{b}{b + R_n}.$$

Очевидно, что по мере уменьшения расхода в регулируемой ветви $f(q_p)$ стремится к единице и зависимость (9.64) принимает вид линейного уравнения

$$q_n = Q_n - m q_p \quad (9.65)$$

Рассмотрим параллельное соединение множества n горных выработок, из которых в последней по счету n -й установлен регулятор. Необходимо найти зависимость, по которой изменится расход в некоторой i -й нерегулируемой выработке $i \in n$ от расхода в регулируемой n -й выработке, если на данное параллельное соединение, как на некую условную сеть, работает вентилятор, напорная характеристика которого описывается уравнением вида (9.27).

Определим следующие соотношения:

$$q_0^2 R_0 = q_1^2 R_1 = q_p^2 R_p; \quad (9.65)$$

$$R_0 = \frac{\prod_{i=1}^{i=n} R_i}{\left[\sum_{i=1}^{i=n} \sqrt{\frac{\prod_{j=1}^{j=i} R_j}{R_i}} \right]^2}. \quad (9.67)$$

Выделив в последнем выражении $\sqrt{R_p}$, получим

$$R_0 = \frac{\prod_{i=1}^{i=n-1} R_i (\sqrt{R_p})^2}{\left[\sqrt{\prod_{i=1}^{i=n-1} R_i} + \sum_{i=1}^{i=n-1} \sqrt{\frac{\prod_{j=1}^{j=i} R_j}{R_i}} \sqrt{R_p} \right]^2}. \quad (9.68)$$

Обозначив

$$A = \sqrt{\prod_{i=1}^{i=n-1} R_i}, \quad B = \sum_{i=1}^{i=n-1} \sqrt{\frac{\prod_{j=1}^{j=i} R_j}{R_i}}, \quad (9.69)$$

можно переписать выражение (9.68) в виде

$$R_0 = \frac{A^2 (\sqrt{R_p})^2}{(A + B \sqrt{R_p})^2}. \quad (9.70)$$

Подставив (9.70) в (9.57) и решив полученное уравнение относительно q_0 , получим

$$q_0 = \frac{\sqrt{a} (A + B \sqrt{R_p})}{\sqrt{A^2 (\sqrt{R_p})^2 + b (A + B \sqrt{R_p})^2}}. \quad (9.71)$$

Из (9.66) следует:

$$q_p = q_0 \frac{A}{A + B \sqrt{R_p}}; \quad (9.72)$$

$$q_1 = \frac{\sqrt{R_p}}{R_1}.$$

Подставив (9.71) в (9.72), получим

$$q_p = \frac{\sqrt{a} A}{\sqrt{A^2 (\sqrt{R_p})^2 + b (A + B \sqrt{R_p})^2}}. \quad (9.73)$$

Решив уравнение (9.73) относительно $\sqrt{R_p}$ и отбросив не имеющее физического смысла отрицательное решение, можем записать

$$\sqrt{R_p} = \frac{A}{q_p(A^2 + bB^2)} [V a(A^2 + bB^2) - A^2 b q_p^2 - bB q_p]. \quad (9.74)$$

Подставив (9.74) в (9.72), получим

$$q_i = \sqrt{\frac{a}{R_i \left[1 + b \left(\frac{B}{A} \right)^2 \right]}} \times \\ \times \sqrt{1 - \left[\frac{q_p}{V a \left[\frac{1}{b} + \left(\frac{B}{A} \right)^2 \right]} \right]^2 - \frac{b q_p}{V R_i \left(\frac{A}{B} + b \frac{B}{A} \right)}}. \quad (9.75)$$

Выражение (9.75) можно представить в виде

$$q_i = Q_i / (q_p) - m_i q_p \quad (9.76)$$

где

$$f(q_p) = \sqrt{1 - \left[\frac{q_p}{V a \left[\frac{1}{b} + \left(\frac{B}{A} \right)^2 \right]} \right]^2}; \\ Q_i = \sqrt{\frac{a}{R_i \left[1 + b \left(\frac{B}{A} \right)^2 \right]}}; \\ m_i = \frac{b}{V R_i \left(\frac{A}{B} + b \frac{B}{A} \right)}.$$

Очевидно, что по мере снижения расхода в регулируемой ветви ($q_p \rightarrow q_{p \text{ min}}$), $f(q_p)$ стремится к единице и зависимость (9.76) принимает вид линейного уравнения

$$q_i = Q_i - m_i q_p \quad (9.77)$$

Таким образом, в обоих рассмотренных случаях линейность зависимости расхода в нерегулируемой ветви от расхода в регулируемой ветви (9.65), (9.77) максимально искажена в начале диапазона регулирования и зависит от некоторой относительной величины φ , определяемой выражением

$$\varphi = \frac{q_{p0}}{Q_i}. \quad (9.78)$$

где q_{p0} — расход в регулируемой ветви до введения дополнительного сопротивления;

Q_i — некоторый постоянный по величине расход, определяемый при параллельном соединении двух ветвей как

$$Q_i = V a \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{R_i} \right). \quad (9.79)$$

а при параллельном соединении нескольких ветвей как

$$Q_c = \sqrt{a \left[\frac{1}{b} + \left(\frac{B}{\lambda} \right)^2 \right]}. \quad (9.80)$$

Подставив величину φ для каждого конкретного случая, можно оценить максимальную погрешность от замены радикала $\sqrt{1 - \varphi^2}$ единицей. Применяя к выражению $\sqrt{1 - \varphi^2}$ с учетом (9.78) разложение в биномиальный ряд, можно записать его в виде

$$\sqrt{1 - \varphi^2} = 1 - \frac{\varphi^2}{2} - \frac{\varphi^4}{8} - \frac{\varphi^6}{48} - \dots = 1 - R_n(\varphi), \quad (9.81)$$

где $R_n(\varphi)$ — остаточный член ряда Маклорена в форме Лагранжа, величина которого определяется для данного конкретного случая

$$R_n(\varphi) < \frac{\varphi^2}{2\sqrt{1 - \varphi^2}}. \quad (9.82)$$

Величина максимальной погрешности

$$\varepsilon_{\max} < R_n(\varphi_{\max}). \quad (9.83)$$

Ориентируясь на общепринятую для практических расчетов точность $\varepsilon_{\max} < 0,05$, из совместного решения (9.82) и (9.83) можно определить допустимое $|\varphi_{\max}|$, при котором еще можно считать исследуемые зависимости (9.65) и (9.77) линейными:

$$\frac{|\varphi_{\max}|^2}{2\sqrt{1 - |\varphi_{\max}|^2}} < 0,05; \quad |\varphi_{\max}| < 0,3. \quad (9.84)$$

Исследуем отношение φ вначале для первого из рассматриваемых случаев, для чего, подставив в (9.78) q_p из (9.61) и Q_c из (9.79), получим

$$\varphi = \frac{R_n}{\sqrt{b(\sqrt{R_n + R_p})^2 + R_p R_n}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_n}{b}}}. \quad (9.85)$$

Введем понятие о коэффициенте глубины регулирования по сопротивлению, показывающим, какую часть от сопротивления нерегулируемой ветви составляет сопротивление регулируемой ветви, т. е.

$$\rho = \frac{R_p}{R_n}. \quad (9.86)$$

Очевидно, что по мере регулирования ρ изменяется от начального $\rho_0 = \rho_{\max}$ до ρ_{\min} , причем

$$\rho_0 = \frac{R_{p0}}{R_n}, \quad (9.87)$$

где R_{p0} — сопротивление регулируемой ветви до регулирования.

Подставив (9.87) в (9.58), получим выражение для подсчета общего сопротивления в исходном режиме

$$R_0 = \frac{R_0 a_0}{(1 + \sqrt{f_0})^2}. \quad (9.88)$$

Будем считать, что оптимальное соотношение между общим сопротивлением сети и внутренним сопротивлением вентилятора (при котором потери мощности, развиваемые вентилятором на внутреннем сопротивлении вентилятора, минимальны) наблюдается в исходном режиме до регулирования, т. е.

$$R_0 = 2b. \quad (9.89)$$

Сравнив (9.88) и (9.89), получим

$$\frac{R_0}{b} = \frac{2(1 + \sqrt{f_0})}{f_0}. \quad (9.90)$$

Подставив (9.90) в (9.87) в (9.85), получим

$$\varphi_{\text{min}} = \frac{0,815}{\sqrt{3p_0 + 4V\bar{p} + 2}}. \quad (9.91)$$

Подставив $\varphi_{\text{min}} = |\varphi_{\text{min}}|$ из (9.84), получим минимально допустимое значение

$$p_0 > 0,75. \quad (9.92)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что практически линейность зависимости (9.65) будет обеспечена, если в исходном (до регулирования) режиме сопротивление регулируемой ветви составляет как минимум 75% сопротивления нерегулируемой ветви.

Исследуем отношение φ для параллельного соединения нескольких p ветвей. Подставив (9.73) в (9.80) в (9.85), получим после некоторых преобразований

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{b}} \frac{1}{\sqrt{\frac{1/b}{1/R_0} + \left(\frac{B}{A} \frac{1}{1/R_0} + 1\right)^2}} \frac{1}{\sqrt{1/b + \left(\frac{B}{A}\right)^2}}, \quad (9.93)$$

где $1/\sqrt{b} = K_0$ — пропускная способность вентилятора;

$1/\sqrt{R_0} = K_p$ — пропускная способность регулируемой ветви;

$\frac{B}{A} = \frac{1}{R_{\text{ин}}}$ — пропускная способность параллельного соединения всех нерегулируемых ветвей.

Согласно (9.86) можно записать

$$R_0 = p_i R_i. \quad (9.94)$$

где p_i — коэффициент глубины регулирования сопротивления для i -й ветви.

Переходя от величины сопротивлений к значениям пропускной способности, можно записать

$$K_i = K_p \sqrt{\rho_i}. \quad (9.95)$$

С учетом последнего выражения пропускная способность всех $p - 1$ нерегулируемых ветвей:

$$\begin{aligned} K_{o.n} &= K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_i + \dots = K_{p-1} = \\ &= K_p \sqrt{\rho_1} + K_p \sqrt{\rho_2} + K_p \sqrt{\rho_3} + \dots + K_p \sqrt{\rho_i} + \dots \\ &\quad \dots + K_p \sqrt{\rho_{p-1}} = K_p \beta, \end{aligned} \quad (9.96)$$

где $\beta = \sum_{i=1}^{p-1} \sqrt{\rho_i}$ — некоторый интегральный коэффициент регулирования пропускной способности, показывающий, во сколько раз общая пропускная способность нерегулируемых ветвей больше пропускной способности регулируемой ветви.

Пропускная способность параллельного соединения сети в целом

$$K_n = K_{o.n} + K_p = K_p (\beta + 1). \quad (9.97)$$

Считая, как и в первом случае, что оптимальность соотношения сопротивления вентилятора и сети сохраняется в исходном режиме, можно записать

$$K_n = \frac{K_n}{\sqrt{2}}. \quad (9.98)$$

Из сопоставления (9.97) и (9.98), (9.96) и (9.97) получим следующие сопротивления (для исходного режима):

$$\frac{K_p}{K_n} = \sqrt{2} (\beta_0 + 1); \quad \frac{K_{o.n}}{K_p} = \beta_0; \quad \frac{K_{o.n}}{K_n} = \frac{\beta_0}{\sqrt{2} (\beta_0 + 1)}, \quad (9.99)$$

где β_0 — исходное значение интегрального коэффициента пропускной способности.

Подставив соотношения (9.99) в (9.93), получим выражение для подсчета максимального значения φ_{\max} или значения φ в исходном режиме:

$$\varphi_{\max} = \frac{0,815}{\sqrt{3\beta_0^2 + 4\beta_0 + 2}}. \quad (9.100)$$

Для сопоставления величин максимальных погрешностей в линейности при параллельном соединении двух и множества выработок положим, что в исходном режиме и во втором случае сопротивление регулируемых ветвей составляет 75% сопротивления каждой нерегулируемой ветви, т. е. каждое $\rho_{oi} = |\rho_{min}| = 0,75$, тогда

$$\varphi_{\max} = 0,75 (p - 1),$$

где p — общее число параллельных ветвей.

Подставив полученное соотношение в (9.100), окончательно имеем

$$Q_{\max} = \frac{0,815}{\sqrt{2,25q^3 - 1,5p + 1,25}} \quad (9.101)$$

Из выражения (9.101) видно, что максимальное значение погрешности расчетов при допущении линейности зависимостей расходов в параллельных ветвях при отрицательном регулировании воздухораспределения снижается с ростом числа параллельных ветвей.

Таким образом, при параллельном соединении двух горных выработок зависимость расхода в нерегулируемой ветви от расхода в регулирующей ветви носит практически линейный характер в определенном диапазоне изменения аэродинамического сопротивления регулируемой ветви.

Эта закономерность проявляется полнее с ростом числа параллельных ветвей.

9.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ

Воздухораспределение в шахтной вентиляционной сети может существенно отличаться от требуемого, в связи с чем возникает необходимость в изменении аэродинамических параметров отдельных элементов (ветвей) сети или всей сети в целом. Наиболее общим способом достижения желаемого воздухораспределения является комбинированный, под которым понимается совместное применение положительного и отрицательного регулирования.

Под исходным режимом проветривания будем понимать режим источника тяги до начала регулирования, а под исходным режимом воздухораспределения — совокупность всех аэродинамических параметров, достаточно полно характеризующих вентиляционную сеть до начала регулирования. Установившимся режимом проветривания будем называть режим источника тяги после окончания процесса регулирования, а установившимся режимом воздухораспределения — совокупность аэродинамических параметров (и в их числе желаемых расходов воздуха по всем ветвям сети), достаточно полно характеризующих вентиляционную сеть после окончания процесса регулирования.

Напорная характеристика большинства источников тяги, достаточно полно характеризующая режим проветривания сети в целом, аппроксимируется уравнением (9.27), откуда

$$a = (R_c + b) q_c^2 \quad (9.102)$$

Умножив обе части уравнения (9.102) на величину kq_c , получим баланс мощностей, развиваемых вентилятором,

$$N = N_c + N_v, \quad (9.103)$$

где N — общая мощность, развиваемая вентилятором;
 N_c — мощность, затрачиваемая на преодоление аэродинамического сопротивления сети, именуемая в дальнейшем полезной мощностью, $N_c = kq_c^2 R_c$;
 N_b — мощность, затрачиваемая на преодоление внутреннего аэродинамического сопротивления вентилятора, именуемая в дальнейшем мощностью затрат, $N_b = kq_c^2 b$;
 k — коэффициент пропорциональности.

Принцип оптимальности применительно к комбинированному регулированию означает соблюдение условия минимальности мощности N , расходуемой на проветривание сети, в целом в установившемся режиме.

Минимум общей мощности наблюдается при минимизации ее составляющих. Причем ограничение мощности затрат означает введение вентилятора в режим, при котором максимум развиваемой им мощности отдается в нагрузку — вентиляционную сеть. Исходя из этого найдем экстремальное условие для функции вида

$$N_c = kq_c^2 R_c. \quad (9.104)$$

Подставив q_c из (9.102) в (9.104), получим

$$N_c = k \frac{a^{3/2} R_c}{(R_c + b)^{3/2}}. \quad (9.105)$$

Продифференцируем (9.105) по переменной R_c :

$$\frac{dN_c}{dR_c} = \frac{ka^{3/2}(b - 0,5R_c)}{(R_c + b)^{5/2}}. \quad (9.106)$$

Отсюда

$$\frac{dN_c}{dR_c} = 0 \text{ при } R_c = 2b. \quad (9.107)$$

Исследуем функцию (9.106) в окрестности найденного значения $R_{c,0} = 2b$, при котором выполняется условие экстремальности, задаваясь значениями:

$$R_{c1} = b < R_{c,0};$$

$$R_{c2} = 3b > R_{c,0};$$

$$\left. \frac{dN_c}{dR_c} \right|_{R_c=R_{c1}} = \frac{ka^{3/2}}{2^{5/2}b^{5/2}} > 0;$$

$$\left. \frac{dN_c}{dR_c} \right|_{R_c=R_{c2}} = -\frac{ka^{3/2}}{2^{5/2}b^{5/2}} < 0.$$

Следовательно, при $R_{c, \text{в}} = 2b$ имеется максимум функции (9.105).

Для достижения наиболее экономичного режима проветривания следует добиваться оптимального соотношения параметров сети и вентилятора в установившемся режиме (9.107), т. е. практически необходимо «приводить» внутреннее сопротивление вентилятора к значению, равному половине общесетевого сопротивления в установившемся режиме ($b_{\text{внт}} = 0.5R_{c, \text{внт}}$). Одновременно необходимо выдерживать минимально потребный общесетевой расход $q_c = q_{c \text{ мин потр}}$.

Подставив эти граничные условия в (9.102), получим значение потребного напора вентилятора, обеспечивающее оптимальный режим его работы,

$$a_{\text{внт}} = 1,5R_{c, \text{внт}} q_{c \text{ мин потр}}^2$$

Минимизация полезной мощности означает при заданном минимально потребном общесетевом расходе (который складывается из минимально потребных расходов по всем ветвям сети) сведение общесетевого сопротивления к установившемуся режиму к тому минимально допустимому значению, при котором еще возможно обеспечение желаемого воздухораспределения

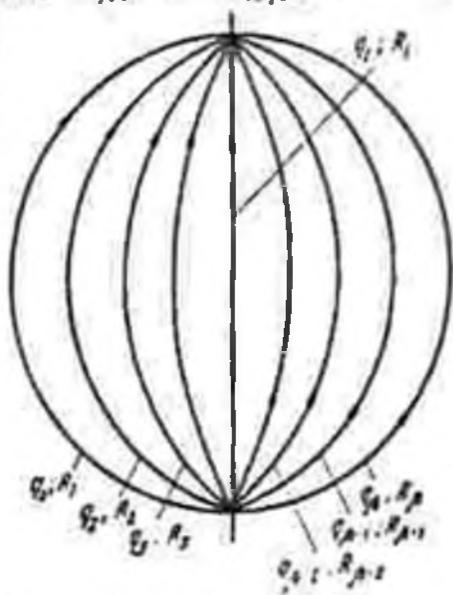


Рис. 9.9. Схема к выбору оптимальных величин сопротивлений в месте установки отрицательных регуляторов для параллельного соединения множества ветвей

методами отрицательного регулирования. Это положение следует из (9.104), если принять $q_c = q_{c \text{ мин потр}} = \text{const}$. Минимизация общего сопротивления сети означает минимизацию общих сопротивлений отдельных узлов, ее составляющих. В качестве таковых в общем случае могут выступать как простые параллельные и диагональные соединения, так и сложные, представляющие собой различные комбинации первых двух. Задача минимизации общего сопротивления сети, таким образом, распадается на ряд задач по минимизации сопротивлений отдельных соединений, составляющих сеть в целом.

Рассмотрим простое параллельное соединение множества ветвей (рис. 9.9). Пусть заданы все минимально потребные расходы q_i по ветвям, которые желательно обеспечить методами отрицательного регулирования, обусловно при этом минимальный прирост общего сопротивления множества N ветвей в целом. Заданы также исходные значения сопротивлений ветвей $R_{\text{вн}}$ до введения дополнительных сопротивлений $R_{\text{рн}}$ регуляторов. Необходимо определить все значения $R_{\text{рн}}$, комбинация которых обеспечила бы

заданное воздудораспределение при минимальных затратах мощности на проветривание в целом.

Очевидно следующее соотношение:

$$q_i^2 (R_{oi} + R_{pi}) = q_o^2 R_o, \quad (9.108)$$

где R_o — общее сопротивление параллельного соединения в установившемся режиме.

$$R_o = \frac{\prod_{i=1}^{i=\beta} R_i}{\left[\sum_{i=1}^{i=\beta} \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^{i=\beta} R_i}{R_i}} \right]^2}, \quad (9.109)$$

q_o — общий расход параллельного соединения, складывающийся из заданных расходов по ветвям.

$$q_o = \sum_{i=1}^{i=\beta} q_i. \quad (9.110)$$

Приняв последнюю по счету β -ю ветвь за базисную, выразим из выражения (9.108) в развернутом виде сопротивления любой другой i -й ветви через сопротивление базисной ветви $R_p = R_{op} + R_{ip}$ и отношения расходов в базисной (q_p) и i -й ветвях:

$$R_i = R_{oi} + R_{pi} = (R_{op} + R_{ip}) \left(\frac{q_p}{q_i} \right)^2. \quad (9.111)$$

Подставив (9.111) в (9.109), получим

$$R_o = \frac{(R_{op} + R_{ip}) \prod_{i=1}^{i=\beta-1} \left(\frac{q_p}{q_i} \right)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=\beta-1} \left(\frac{q_p}{q_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^{i=\beta-1} \sqrt{1 + \left(\frac{q_p}{q_i} \right)^2}}} = C (R_{op} + R_{ip}). \quad (9.112)$$

Из (9.112) видно, что при заданных q_i и q_p общее сопротивление параллельного соединения прямо пропорционально сопротивлению базисной ветви, а минимальное значение R_o принимает при $R_{p \min}$. Поскольку последнее может состоять в общем случае из постоянной R_{op} и переменной R_{ip} составляющих, то очевидно, что минимальное значение сопротивления базисной ветви можно получить, положив $R_{ip} = 0$, тогда

$$R_p = R_{p \min} = R_{op}. \quad (9.113)$$

Таким образом, минимизация мощности на проветривание параллельного соединения множества B ветвей в целом дости-

гается, если одна из ветвей множества (базисная) не содержит отрицательного регулятора.

Учитывая (9.113), выражение (9.111) можно переписать в виде

$$R_{oi} + R_{pi} = R_{ob} \left(\frac{q_b}{q_i} \right)^2,$$

откуда

$$R_{pi} = R_{ob} \left(\frac{q_b}{q_i} \right)^2 - R_{oi} = \frac{R_{ob} q_b^2 - R_{oi} q_i^2}{q_i^2}. \quad (9.114)$$

Из (9.114) видно, для того чтобы все $R_{pi} > 0$ (т. е. имели бы физический смысл положительного приращения аэродинамического сопротивления), нужно, чтобы для каждой i -й ветви выполнялось условие

$$R_{ob} q_b^2 > R_{oi} q_i^2. \quad (9.115)$$

Таким образом, для правильного выбора местоположения базисной ветви необходимо вычислить все i -е произведения вида $h_{oi} = R_{oi} q_i^2$, именуемые в дальнейшем «начальными» депрессиями ветвей, и выявить максимальное произведение из этого ряда. Ветвь, которой соответствует максимальная «начальная» депрессия ($h_{ob} = h_{o, \max}$), и следует принять в качестве базисной, а сопротивление регуляторов и остальных ветвей определить по формуле (9.114).

Рассмотрим простое диагональное соединение (рис. 9.10, а). Пусть, как и в случае параллельного соединения, заданы минимально потребные расходы на всех участках q_{ij} (как по величине, так и по направлению), а также заданы сопротивления всех участков R_{oij} в исходном режиме и требуется определить величины дополнительных сопротивлений отрицательных регуляторов на всех участках R_{pij} , комбинация которых позволяла бы осуществить заданное воздухододеление при минимальном приросте общего сопротивления диагонального соединения в целом.

Обозначения q_{ij} , h_{ij} , R_{oij} , R_{pij} означают соответственно расходы депрессии и постоянные и переменные составляющие сопротивлений на участках, заключенных между узлами i и j (где i и j могут принимать для простого диагонального соединения значения соответственно $i = 1, 2, 3$, $j = 2, 3, 4$), причем порядок занисси индексов i, j для расхода или депрессии означает его направление от i к j и наоборот.

Решение этой задачи сводится к рассмотренной для параллельного соединения, если воспользоваться методом преобразования

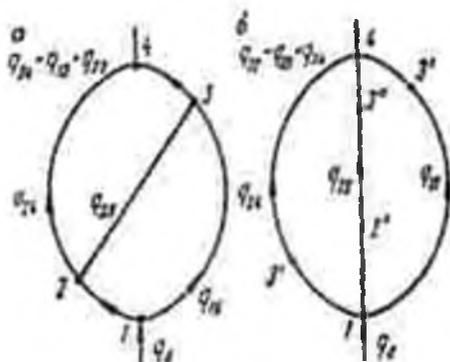


Рис. 9.10. Схема преобразования диагонального соединения в эквивалентное ему параллельное

диагонального соединения в параллельное, основанном на учете взаимного влияния составляющих струй — маршрутов диагонального соединения при одновременном прохождении их по одним и тем же участкам. Это влияние можно учесть, а характер его выявить из условия однозначности депрессий на отдельных участках по любому из маршрутов, в которые они включены.

Для эквивалентной схемы (рис. 9.10, б):

$$h_{12'} - h_{12} = q_{21}^2 R_{12'} = q_{21}^2 R_{12} = (q_M + q_M)^2 R_{12}; \quad (9.116)$$

$$h_{21'} - h_{21} = q_{12}^2 R_{21'} = q_{12}^2 R_{21} = (q_M + q_M)^2 R_M. \quad (9.117)$$

где индексы со штрихами означают номера узлов эквивалентных параллельных ветвей-маршрутов, соответствующие узлам реального диагонального соединения.

Из (9.116) и (9.117) сопротивления участков эквивалентных параллельных ветвей:

$$\begin{aligned} R_{12'} &= R_{12} \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{21}}\right)^2; \\ R_{12} &= R_{12} \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{21}}\right)^2; \\ R_{21'} &= R_M \left(1 + \frac{q_{11}}{q_{11}}\right)^2; \\ R_{21} &= R_M \left(1 + \frac{q_{11}}{q_{11}}\right)^2. \end{aligned} \quad (9.118)$$

Таким образом, диагональное соединение может быть представлено в виде трех эквивалентных параллельных ветвей с сопротивлениями:

$$R_{12'} = R_{12} \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{21}}\right)^2 + R_M;$$

$$R_{12} = R_M \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{12}}\right)^2 + R_{12};$$

$$R_{12'21'} = R_{12} \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{21}}\right)^2 + R_M \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{21}}\right)^2 + R_M \quad (9.119)$$

и расходами соответственно q_M , q_{12} , q_{12} .

Дальнейший ход решения аналогичен для параллельного соединения.

Выявляем максимальную из ряда начальных депрессий, рассчитанных по формулам:

$$h_{0, 12-1} = \left[R_{12}, \left(1 + \frac{q_{12}}{q_{21}} \right)^2 + R_{21} \right] q_{21}^2$$

$$h_{0, 12-1} = \left[R_{21}, \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{12}} \right)^2 + R_{12} \right] q_{12}^2$$

$$h_{0, 12-1} = \left[R_{12}, \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{12}} \right)^2 + R_{21}, \left(1 + \frac{q_{12}}{q_{21}} \right)^2 + R_{12} \right] \quad (9.120)$$

и, принимая соответствующую ей эквивалентную ветвь в качестве базисной, сопротивления регуляторов участков, входящих пересчитанным образом в эту ветвь, считаем равными нулю.

Тогда в случае, когда максимальная начальная депрессия приходится на эквивалентную ветвь, несущую диагональный расход, сопротивления остальных двух эквивалентных параллельных ветвей определятся однозначно из условия равенства депрессий узлов 1 и 4 эквивалентной схемы по любому маршруту:

$$h_{11} = h_{09} = q_{21}^2 R_{12-1} = q_{12}^2 R_{12-1} \quad (9.121)$$

где

$$h_{09} = q_{21}^2 \left[R_{12}, \left(1 + \frac{q_{12}}{q_{21}} \right)^2 + R_{21}, \left(1 + \frac{q_{12}}{q_{21}} \right)^2 + R_{21} \right] -$$

начальная депрессия базисной эквивалентной ветви.

Из совместного решения (9.121) и (9.119) в развернутом виде:

$$\begin{aligned} R_{21_p} &= h_{09} - R_{12_p} \left(1 + \frac{q_{12}}{q_{21}} \right)^2 - R_{21_p} \\ R_{12_p} &= h_{09} - R_{21_p} \left(1 + \frac{q_{12}}{q_{21}} \right)^2 - R_{12_p} \end{aligned} \quad (9.122)$$

Сложнее, если в качестве базисной оказывается одна из перечисленных эквивалентных ветвей, не несущая диагонального расхода. Тогда, приняв, например, $h_{09} = h_{012-1}$ из условия равенства депрессии узлов 1 и 4 эквивалентной схемы по любому маршруту, следует, что

$$h_{11} = h_{09} = q_{21}^2 R_{12-1} = q_{12}^2 R_{12-1} \quad (9.123)$$

Из совместного решения (9.123) и (9.113) получим систему из двух уравнений для определения неизвестных сопротивлений регуляторов на трех оставшихся участках:

$$\left. \begin{aligned} A_1 R_{120} + R_{100} &= C_1 \\ A_2 R_{120} + R_{100} &= C_2 \end{aligned} \right\} \quad (9.124)$$

$$A_1 = \left(1 + \frac{q_{12}}{q_{11}}\right)^2; \quad C_1 = h_{02} - R_{120}A_1 - R_{200};$$

$$A_2 = \left(1 + \frac{q_{21}}{q_{22}}\right)^2; \quad C_2 = h_{01} - R_{120}A_2 - R_{200}.$$

Поскольку критерий выбора базисной ветви обеспечивает положительность коэффициентов A_1 , A_2 , C_1 , C_2 , то система (9.124) из двух уравнений с тремя неизвестными имеет, как известно, бесчисленное множество решений в интересующей нас области корней.

Из этого множество для практики существенны также комбинации решений, которые включали бы максимальное число нулевых корней (т. е. позволили бы обойтись минимумом регуляторов). Геометрически такие решения представляют собой координаты точек входа и выхода прямой, заданной системой (9.124) в пространственной системе координат x , y , z , где $x = R_{120}$, $y = R_{200}$, $z = R_{210}$, и положительный октант этого пространства. Отсюда следует вывод, что таких комбинаций может быть две и обе в общем случае интересны для практики. Проанализируем следующие возможные варианты:

Пусть $R_{120} = 0$, тогда из (9.124) получим $R_{210} = C_1$.

Пусть $R_{120} = 0$, тогда

$$R_{210} = C_2; \quad R_{120} = \frac{C_1}{A_1}; \quad R_{200} = \frac{C_2A_1 - C_1A_2}{A_1}.$$

Пусть $R_{210} = 0$, тогда

$$R_{120} = \frac{C_1}{A_1}; \quad R_{200} = \frac{C_1A_2 - C_2A_1}{A_2}.$$

В первом случае отличные от нуля корни положительны и, следовательно, реальны, в двух последних же случаях условие положительности выражается неравенствами соответственно $C_1A_1 > C_1A_2$ и $C_1A_2 > C_2A_1$. Неравенства показывают, что в каждом отдельном случае они сводятся к условию преобладания начальной депрессии соответствующего участка, т. е. соответственно $h_{011} > h_{021}$ и $h_{022} > h_{012}$. Таким образом, практически реализуются всегда первый и один из двух последних случаев.

Следовательно, можно считать доказанным, что для осуществления заданного воздушного распределения в таком соединении достаточно установить отрицательные регуляторы на двух из пяти участков.

Места установки регуляторов зависит от того, какую из эквивалентных параллельных ветвей можно принять за базисную, т. е. свободную от регуляторов. Критерием выбора базисной ветви является преобладание ее начальной депрессии над начальными

депрессиями двух других параллельных ветвей. В случае выбора в качестве базисной ветви, несущей диагональный расход, сопоставления регуляторов и места их установки находятся однозначно, в других случаях необходимо ориентироваться на реальные, т. е. положительные значения регулируемых составляющих участков.

2.8 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ ШАХТ И РУДНИКОВ В СИСТЕМЕ ДИСПЕТЧЕРСКОГО И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ

К настоящему времени достаточно полно разработаны методы расчета вентиляционных сетей шахт и рудников для управления проветриванием, которые основаны на представлении всей системы в виде конечного связанного графа с сосредоточенными параметрами. При решении задач управления по этому методу необходимо иметь численные значения всех аэродинамических параметров вентиляционной сети, которые определяются при проведении воздушно-депресссионных съемок.

Применение данного метода для расчета на ЭВМ параметров регулирующих устройств и вентиляторов главного проветривания для обеспечения требуемого воздухораспределения затруднительно ввиду того, что топология и параметры вентиляционной сети в процессе ведения горных работ непрерывно изменяются.

Это обстоятельство требует корректировки исходных данных, заложенных в программу расчета, и вызывает необходимость частого проведения депрессионных съемок и ввода их результатов в ЭВМ.

Кроме того, методы нелинейного программирования предусматривают необходимость точного знания законов движения воздуха в горных выработках. В настоящее время законы движения воздуха через зоны обрушения и выработанные пространства, а также характер влияния перечисленной естественной зати еще недостаточно изучены. Это приводит к тому, что ошибка расчета на ЭВМ расхода воздуха для выработок, и распределения воздуха по которым выработанные пространства играют заметную роль, достигает значительных величин.

Сложности, непостоянство во времени параметров и топологии, недостаточная изученность вентиляционной сети шахты или рудника как объекта управления обусловило то, что до настоящего времени практически нет действующих систем оперативного управления проветриванием.

Более того, подавляющее большинство вентиляторов главного проветривания шахт и рудников работают с к. п. д. менее 0,6. Более 50% потребляемой приходами вентиляторов электроэнергии расходуется непроизводительно. На это следует обратить особое внимание, так как главные вентиляторные установки шахт угольной и горнорудной промышленности потребляют примерно 1% электроэнергии, вырабатываемой электростанциями страны.

Реализация системы диспетчерского управления режимом проветривания рудника в функции состояния воздухораспределения в сети и минимума потребляемой мощности на проветривание является оптимальным технологическим и экономическим решением вопроса.

Решение комплексной задачи по поддержанию расчетного воздухораспределения в вентиляционной сети с контролем оптимального режима работы вентиляторов и по мере необходимости смещения его в точку оптимума позволит получить значительный экономический эффект.

Эту задачу уже в настоящее время могут решать системы диспетчерского контроля и управления проветриванием шахты или рудника, если в них для определения параметров регулирующих устройств регуляторов расхода воздуха и вентиляторов главного проветривания, при которых обеспечивается оптимальный режим проветривания, применить математическую теорию планирования эксперимента.

Существенным преимуществом статистического подхода к решению задач оптимизации является то обстоятельство, что их можно решать даже при весьма низком уровне теоретических знаний о ходе оптимизируемого процесса.

Современная математическая статистика при решении экстремальных задач использует активные эксперименты, при которых объект управления представляется в виде черного ящика с входными и выходными параметрами. Изменяя значение входных параметров по специальному образом составленному плану, фиксируя в каждом опыте значение выходных параметров, можно найти математическую модель исследуемого процесса.

Пользуясь этими методами, можно при минимальных затратах труда найти алгоритмы для оптимизации процесса и управления им.

Для успешного применения метода планирования эксперимента необходимо изучить априорную информацию о вентиляционной системе шахты или рудника как объекта управления для определения с максимальной достоверностью входных параметров и наиболее приемлемого критерия оптимизации.

Дальнейшее рассмотрение вопроса ведется преимущественно применительно к проветриванию рудника.

Вентиляционные сети рудников характеризуются неоднородным характером входящих в них выработок. Выработки можно разделить на два типа.

К первому типу можно отнести выработки для подачи воздуха на горизонты, крылья и выдачи его на поверхность. Это — столбы, квершлагги, откаточные и сборочные вентиляционные штреки. Эти выработки характеризуются постоянством параметров во времени и пространстве, большими расходами воздуха, которые могут контролироваться с достаточной точностью существующими приборами оперативного контроля.

Для управления воздухораспределением между крыльями и горизонтами в выработках первого типа необходимо устанавливать групповые регуляторы расхода воздуха.

Ко второму типу относятся выработки, входящие в сети блокная, которые характеризуются большой разветвленностью, изменением параметров в пространстве и времени, малыми расходами воздуха в ветвях. Изменение параметров ветвей существенно изменяет воздухораспределение внутри блока во времени, в то время как поступающий в блок воздух и перепад давлений остаются примерно постоянными.

При обработке рудных залежей в Крибассе получили широкое распространение штреки-коллекторы для сбора загрязненного воздуха с одного или одновременно двух горизонтов. Для правильного распределения воздуха между блоками необходимо регулировать расход воздуха в каждом блоке путем установки РРВ на сопряжениях сборочных вентиляционных ортов со штреком-коллектором.

Главные вентиляционные установки рудников Крибассе представлены, как правило, центробежными вентиляторами большой мощности.

Чаще всего регулирование производительности вентиляторов осуществляется аэродинамическим методом путем изменения угла поворота лопаток направляющего аппарата.

Таким образом, для поддержания оптимального режима проветривания рудника можно менять режимы работы главных вентиляционных установок, изменяя угол установки лопаток направляющего аппарата, управлять воздухораспределением между горизонтами и крыльями, изменяя сопротивление групповых регулирующих устройств, управлять распределением воздуха между блоками, изменяя аэродинамическое сопротивление регулирующих устройств на исходящих вентиляционных ортах блоков.

Из-за большой разветвленности сетей изменение распределения воздуха внутри блока одного крыла рудника практически не влияет на воздухораспределение между крыльями, горизонтами и на режимы работы ВГП.

Учитывая вышесказанное, общешахтную систему оперативного управления проветриванием рудника можно разбить на две подсистемы.

Первая — система оперативного управления режимами работы ВГП в функции аэродинамических сопротивлений групповых регуляторов расхода воздуха (для обеспечения расчетного воздухораспределения), максимального $k_{пд}$ и минимальной потребляемой мощности вентиляционными установками.

Вторая — система оперативного управления воздухораспределением между блоками крыла.

Чтобы обеспечить успешную эксплуатацию таких систем, необходимо достаточно простой алгоритм управления положением регулирующих устройств, учитывающий как параметры и тополо-

гию вентиляционной сети, так и параметры вентиляторных установок и позволяющий оперативно корректировать параметры регулирующих устройств при изменении топологии и параметров сети в процессе ведения горных работ.

Для определения параметров регулирующих устройств и их корректировки ниже предлагается алгоритм управления, основанный на теории планирования эксперимента.

Метод экстремальных экспериментов позволяет уже в настоящее время без вложения капитальных затрат оптимизировать работу нескольких ВГП, работающих на одну и ту же сеть.

Сущность метода рассмотрим на примере вентиляционной сети рудника, на которую работают три центробежных вентилятора с нерегулируемым приводом. Требуется найти оптимальные углы установки направляющих аппаратов вентиляторов в функции поддержания заданного воздухораспределения между горизонтами и крыльями, максимального к. п. д. и минимальной потребляемой мощности.

Представим вентиляционную систему в виде черного ящика с входными параметрами: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ — углы установки направляющих аппаратов ВГП, градус; и выходными параметрами: η_1, η_2, η_3 — к. п. д. вентиляторов; N_1, N_2, N_3 — потребляемая вентиляторами мощность, кВт; Q_1, Q_2, Q_3 — расходы воздуха в главных вентиляционных выработках (рис. 9.11), м³/с.

Входные параметры (их называют факторами) управляемы, коррелированы и совместимы.

Выходные параметры можно измерить непосредственно или определить косвенным путем.

Будем целенаправленно менять значения факторов и измерять выходные параметры. Эксперимент такого вида называется активным и его можно планировать.

Для конкретного объекта, учитывая априорную информацию, необходимо выбрать нулевые уровни значений факторов и шаг варьирования.

Применительно к ВГП выбираем нулевой уровень угла установки направляющих аппаратов ВГП — угол, соответствующий середине зоны промышленного использования (рис. 9.12). Шаг варьирования выбираем так, чтобы изменение фактора охватывало всю зону промышленного использования.

Для газовых шахт такой эксперимент представляет некоторую опасность, так как резкое изменение режима работы ВГП может привести к значительному изменению воздухораспределения в сети и на отдельных участках концентрации метана может превысить допустимые нормы.

Рекомендации по проведению таких экспериментов на газовых шахтах будут рассмотрены ниже.

Полный факторный эксперимент предусматривает проведение 2^k опытов (где k — количество факторов). В каждом опыте уровни факторов задлются различными комбинациями.

При наличии трех факторов рассмотрим трехмерное факторное пространство (рис. 9.13).

Для трех факторов опыты проводятся при комбинации факторов, соответствующих координатам вершины куба, который имеет центр в точке $(\theta_{10}, \theta_{20}, \theta_{30})$, а ребро имеет длину в два шага варьирования.

Задать план проведения эксперимента можно с помощью матрицы.

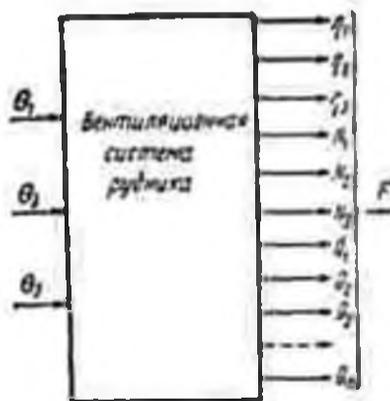


Рис. 9.11. Блок-схема управления режимом проветривания руфина

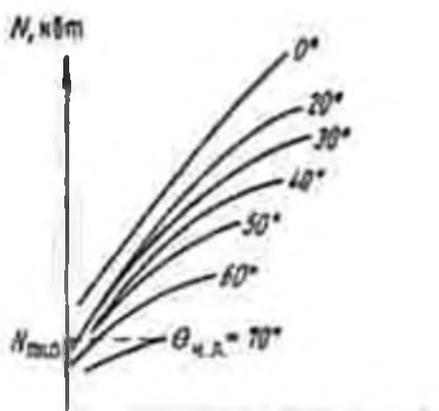
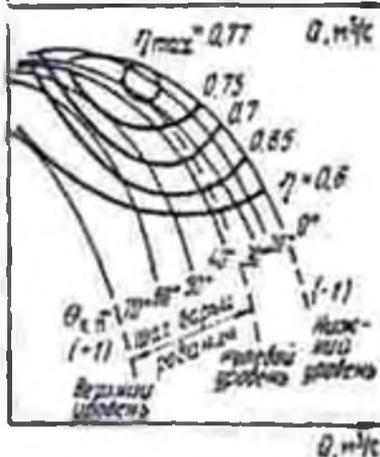


Рис. 9.12. Определенные значения и выходные параметры режима работы главной вентиляционной установки



Если изменить начало отсчета (перенести его в точку нулевого уровня) и изменить масштаб осей с натуральных значений угла установки нагревательного аппарата в шаг варьирования, то план проведения эксперимента можно записать в виде матрицы. В новой системе координат вершины куба (точки проведения опытов) выражены в кодированных величинах, в шагах варьирования, которые принимают значения $+1$ или -1 (табл. 9.1).

Для перехода с кодированных значений в натуральные и наоборот можно получить зависимости перевода

$$\bar{\theta} \Delta \theta = \theta - \theta_{0, \gamma} \quad (9.125)$$

где $\bar{\theta}$ — кодированное значение фактора;
 $\Delta \theta$ — шаг варьирования, градус;

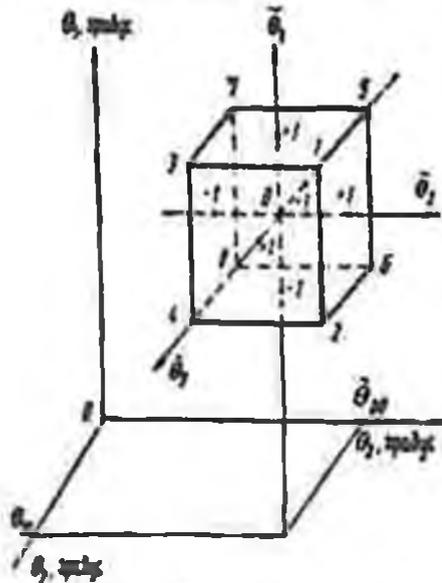
θ — натуральное значение фактора, градус;

$\theta_{0, \gamma}$ — нулевой уровень фактора, градус

Смысл сбора и накопления информации состоит в том, чтобы узнать, где же находится точка оптимума режимов работы ВГП, куда она смещается в процессе изменения параметров и топологии вентиляционной сети.

Реализовав полный факторный эксперимент, находим математическую модель режима проветривания рудника в виде системы уравнений, которые выражают

зависимость к. п. д. вентиляторов, потребляемой ими мощности, расходов воздуха на крыльях и горизонтах в функции углов установки лопаток направляющих аппаратов вентиляторов:



$$\begin{aligned} \eta_1 &= f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ \eta_2 &= f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ \eta_3 &= f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ N_1 &= f_4(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ N_2 &= f_5(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ Q_1 &= f_6(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \\ Q_2 &= f_7(\theta_1, \theta_2, \theta_3); \end{aligned} \quad (9.126)$$

Рис. 9.13. План проведения эксперимента

где k — количество точек контроля расхода воздуха в сети.

Полный факторный эксперимент позволяет получить уравнения системы (9.126) в виде

$$\eta(N, Q) = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \theta_i + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}} b_{ij} \theta_i \theta_j + \sum_{\substack{i,j,\gamma \\ i < j < \gamma}} b_{ij\gamma} \theta_i \theta_j \theta_\gamma, \quad (9.127)$$

где $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; \gamma = 1, 2, 3;$

b_0 — свободный член уравнения;

b_i — коэффициенты при линейных членах;

$b_{ij}, b_{ij\gamma}$ — коэффициенты при эффектах взаимодействия.

Таблица 9.1

Номер опыта	θ_1	θ_2	θ_3	Номер опыта	θ_1	θ_2	θ_3
1	+1	+1	+1	5	+1	+1	-1
2	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1
3	+1	-1	+1	7	+1	-1	-1
4	-1	-1	+1	8	-1	-1	-1

Примечание. Полный факторный эксперимент 2³.

Планируя эксперимент, на первом этапе стремится получить линейную модель. Существуют способы проверки пригодности линейной модели (проверка адекватности).

Чаще всего встречаются случаи, когда эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор. В этом случае имеет место эффект взаимодействия двух факторов. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценить эффекты взаимодействия. Для этого надо, пользуясь правилом перемножения столбцов матрицы, получить столбцы произведений факторов.

Матрица планирования эксперимента 2^3 с учетом всех возможных взаимодействий приведена в табл. 9.2

Таблица 9.2

Номер опыта	\bar{a}_1	\bar{a}_2	\bar{a}_3	$\bar{a}_1\bar{a}_2$	$\bar{a}_1\bar{a}_3$	$\bar{a}_2\bar{a}_3$	$\bar{a}_1\bar{a}_2\bar{a}_3$	$\eta(N, Q)$
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	η_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	η_2
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	η_3
4	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	η_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	η_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	η_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	η_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	η_8

Примечание. Полный факторный эксперимент 2^3 с учетом взаимодействий факторов.

Рассмотрим способ нахождения коэффициентов b_1, b_2, b_{12} уравнения (9.127).

Для определения коэффициентов уравнений применяем метод наименьших квадратов, который благодаря симметричности матрицы относительно центра эксперимента $\left(\sum_{i=1}^N \theta_{ij} \right)$, где i — номер фактора, N — число опытов и условию нормировки (сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов, или $\sum_{i=1}^N \theta_{ij}^2 = N$) сводится к простым арифметическим операциям по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \eta(N, Q)}{N}; \quad (9.128)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_{1i} \eta(N, Q)}{N}, \quad (9.129)$$

где b_0 — свободный член уравнения (9.127);

b_i — коэффициенты при переменных уравнения (9.127);

θ_i — значение фактора или эффекта взаимодействия (табл. 9.2).

Вычислив коэффициенты уравнений системы (9.126) сводятся к присваиванию столбцу η (N , Q) знаков соответствующего фактора или эффекта взаимодействия и алгебраическому сложению полученных значений. Деление результата на число опытов в матрице планирования дает искомый коэффициент.

Таким образом, определив коэффициенты, получим систему уравнений (9.126) в кодированных значениях переменных. Воспользовавшись формулой перевода (9.125), можно эту систему получить в натуральных значениях переменных.

Подставив в систему (9.126) заданные значения η , N , Q , решая ее совместно, можно найти необходимые углы установки лопаток направляющих аппаратов вентиляторов.

Так как число уравнений системы значительно больше числа неизвестных, то система уравнений переопределенная, т. е. она может иметь бесконечно много решений или может не иметь решений.

Это обстоятельство вызывает необходимость поиска одного обобщенного критерия оптимизации, который учитывал бы как технологические, так и экономические требования. Он должен быть количественным и выражаться одним числом, иметь физический смысл, простым и легко определяемым.

Параметрами оптимизации являются расходы воздуха в ветвях вентиляционной сети, потребляемая мощность вентиляторов и их к. п. д. Каждый из них имеет свой физический смысл и свою ратчерность. Чтобы их объединить, введем для каждого из них безразмерную шкалу.

Поступим следующим образом: при проведении эксперимента будем в каждом опыте вычислять отношения:

$$\frac{\eta_{ki}}{\eta_{k \max}}, \quad \frac{Q_{ji}}{Q_{j \text{ расч}}}, \quad \frac{N_{ki \min}}{N_{ki}}, \quad (9.130)$$

где η_{ki} — к. п. д. k -го вентилятора в i -м опыте ($k = 1, 2, 3$);

N_{ki} — потребляемая мощность k -го вентилятора в i -м опыте, кВт;

Q_{ji} — расход воздуха в j -й ветви при i -ом опыте, м³/с;

$\eta_{k \max}$ — максимальное к. п. д. k -го вентилятора;

$N_{k \min}$ — минимальная потребляемая мощность k -го вентилятора при регулировании направляющим аппаратом, кВт;

$Q_{j \text{ расч}}$ — расчетный расход воздуха в j -й ветви, м³/с.

Отношения (9.130) в пределе в оптимальном режиме стремятся к единице. Вне оптимума они, как правило, будут меньше единицы. Такая шкала для всех параметров становится однородной — это делает их сравнимыми.

Вычислив среднеквадратическое значение отношений (9.130) для каждого опыта

$$F = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^k \left(\frac{\eta_{br}}{\eta_{k \max}}\right)^2 + \sum_{k=1}^k \left(\frac{N_{k \max}}{N_{br}}\right)^2 + \sum_{j=1}^j \left(\frac{Q_{1j}}{Q_{1 \max}}\right)^2}}{2k + j} \quad (9.131)$$

где F — обобщенный критерий оптимизации;

k — количество оптимизируемых вентиляторов;

j — количество ветвей сети, в которых оптимизируется расход воздуха.

можно систему уравнений (9.126) свести к одному уравнению

$$F = f(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (9.132)$$

После этого проверяется, насколько точно значения, вычисленные по уравнению (9.132), совпадают со значениями, полученными в результате эксперимента. Оценка адекватности уравнения (9.132) производится по критерию Фишера.

Исследовав зависимость (9.132) на максимум, находим значения углов установки лопаток направляющих аппаратов вентиляторов, при которых режим проветривания будет оптимальным как с экономической, так и с технологической точки зрения.

Однако следует отметить, что найденный с помощью этого критерия оптимальный режим по многим переменным (Q , N , η) не всегда дает желаемую (менее 10%) точность по расходу воздуха.

Необходимо даже в ущерб экономической эффективности выбрать критерий оптимизации так, чтобы производительность вентиляторов главного проветривания, расход воздуха через регуляторы (отрицательные или положительные) в сети были равны расчетным или незначительно отличались от них (желательно в большую сторону), а проветривание осуществлялось при минимальных перепадах давления.

Как известно, производительность и напор вентилятора определяются точкой пересечения напорной характеристики с характеристикой сети.

При параллельной работе нескольких вентиляторов режим работы каждого из них зависит как от величины аэродинамического сопротивления сети, так и от режима работы других вентиляторов. Если входные параметры (угол установки направляющего аппарата, частота вращения паза рабочего колеса) одного из параллельно работающих вентиляторов будут оставаться постоянными, а входные параметры других вентиляторов изменять, то режим работы первого не остается постоянным. Рабочая точка будет смещаться в сторону точки 2 или 3 (рис. 9.14). При этом изменяются напор и производительность вентилятора на величину ΔH и ΔQ в ту или иную сторону.

Таким образом, при параллельной работе нескольких вентиляторов на сеть наблюдается взаимное влияние их друг на друга

Сопротивление R_{Σ} , на которое работает каждый из вентиляторов, зависит как от собственного режима работы, так и от режима работы остальных вентиляторов.

Кроме того, положение рабочей точки вентиляторов зависит от величины и направления естественной тяги. Рис. 9.14 дает представление о качественной картине изменения положения рабочей точки при:

изменении сопротивления сети и режимов работы вентиляторов при нулевой естественной тяге (рис. 9.14, а);

изменении сопротивления сети и режимов работы вентиляторов при наличии отрицательной естественной тяги (рис. 9.14, б);

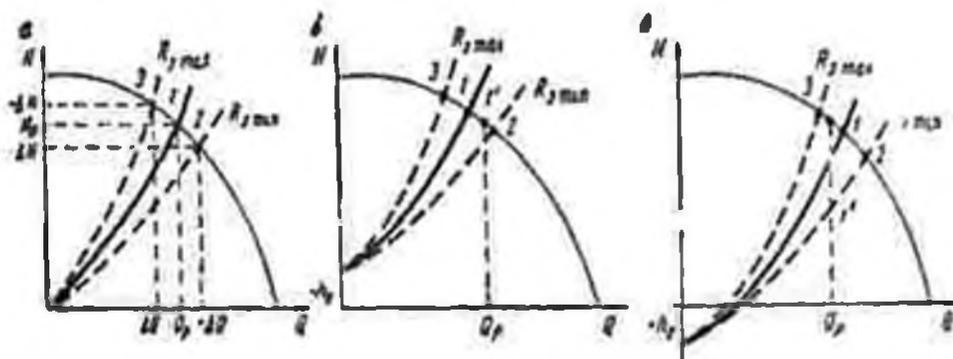


Рис. 9.14. Положение рабочей точки при изменении внутренних и внешних возмущений в вентиляционной системе

изменении сопротивления сети и режимов работы вентиляторов при наличии положительной естественной тяги (рис. 9.14, в).

Необходимо критерий оптимизации выбрать так, чтобы режим работы каждого из вентиляторов был как можно ближе к наиболее легкому для расчетной производительности (точка 1 на рис. 9.14) и при этом его производительность отличалась от расчетной на минимально возможную положительную величину.

Исходя из этого необходимо найти такую комбинацию входных параметров вентиляторов главного проветривания и регуляторов расхода воздуха в сети (при их наличии), чтобы сопротивление, на которое работает каждый из вентиляторов, было возможно ближе к минимальному $R_{\Sigma \text{ мин}}$, а напорная характеристика каждого из вентиляторов проходила вблизи точки 1.

Можно в этом случае использовать нуль-критерий, при котором величина

$$\Phi = \frac{\sum \left(\frac{Q_i - Q_{iP}}{Q_{iP}} \right)}{N} + \frac{\sum \left(\frac{q_i - q_{iP}}{q_{iP}} \right)}{n} + \frac{\sum \left(\frac{R_{\Sigma i \text{ мин}} - R_{\Sigma i}}{R_{\Sigma i}} \right)}{N}$$

(9.133)

в оптимальном режиме будет равна нулю или близка к нему.

Здесь Q_i — производительность i -го вентилятора ($i = 1, 2, \dots, N$);

N — число параллельно работающих вентиляторов;

$Q_{i,p}$ — расчетная производительность i -го вентилятора;

q_j — расход воздуха через j -й регулятор расхода воздуха в сети ($j = 1, 2, \dots, n$);

n — число регуляторов в сети;

R_{2i} — сопротивление, на которое работает i -й вентилятор;

$R_{2i, \min}$ — минимально возможное значение сопротивления, на которое работает i -й вентилятор;

k — число групп однотипных оптимизируемых параметров.

Третий член в числителе выражения (9.133) при любых режимах проветривания будет равен нулю или иметь отрицательное значение, так как всегда $R_{2i, \min} < R_{2i}$. Поэтому при равенстве критерия Φ нулю суммарная средняя относительная невязка производительности вентиляторов и расходов воздуха в ветвях с регуляторами будет всегда равна нулю или иметь положительное значение.

Таким образом, для определения зависимости

$$\Phi = \Phi(\theta_1, \dots, \theta_k, \alpha_1, \dots, \alpha_k), \quad (9.134)$$

где θ_i, α_i — входные регулируемые параметры вентиляционной системы (угол установки лопаток, частота вращения вала рабочего колеса вентилятора, угол установки регулирующего органа),

необходимо провести полный факторный эксперимент по вышеизложенной методике: в каждом опыте измерить производительность, напор, потребляемую мощность каждого вентилятора, расход воздуха через регуляторы расхода воздуха в сети. Зная величину и направление естественной тяги h_e , к. п. д. передачи, для каждого опыта вычислить:

$$R_{2i} = \frac{H_i \pm h_e}{Q_i^2}, \quad (9.135)$$

$$\eta_{i, \text{ст}} = \frac{R_{2i} Q_i^2}{N_i \eta_{i, \text{эп}} 102} \quad (9.136)$$

статистический к. п. д. каждого вентилятора и сопротивление, на которое работает каждый вентилятор.

Применив метод наименьших квадратов, можно получить математическую модель вентиляционной системы (вентиляторы главного проветривания — сеть) в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= f(\theta_1, \dots, \theta_i, n_1, \dots, n_i, \alpha_1, \dots, \alpha_i); \\ H_i &= f(\theta_1, \dots, \theta_i, n_1, \dots, n_i, \alpha_1, \dots, \alpha_i); \\ \eta_i &= f(\theta_1, \dots, \theta_i, n_1, \dots, n_i, \alpha_1, \dots, \alpha_i); \\ q_i &= f(\theta_1, \dots, \theta_i, n_1, \dots, n_i, \alpha_1, \dots, \alpha_i); \\ R_{2i} &= f(\theta_1, \dots, \theta_i, n_1, \dots, n_i, \alpha_1, \dots, \alpha_i). \end{aligned} \right\} (9.137)$$

Для определения $R_{2i, \min}$ необходимо исследовать на экстремум зависимости $R_{2i} = f(\theta_1, \dots, \theta_i, n_1, \dots, n_i, \alpha_1, \dots, \alpha_i)$, которые являются функциями с несколькими независимыми переменными с ограничениями. Для нахождения $R_{2i, \min}$ в замкнутой области рекомендуется применить последовательный симплексный метод.

Далее, зная для каждого опыта Q_i, q_i, R_{2i} по выражению (9.133), вычисляем значение критерия Φ и по методу наименьших квадратов находим зависимость

$$\Phi = \Phi_1(\theta_1, \dots, \theta_i, n_1, \dots, n_i, \alpha_1, \dots, \alpha_i).$$

Для определения значения входных параметров, при которых критерий Φ будет равен нулю или близок к нему, применяем последовательный симплексный метод.

Найденный режим проветривания предполагается оптимальным. Для проверки правильности решения задачи, используя математическую модель режимов проветривания, определяются производительность и статический к. п. д. вентиляторов, а также расходы воздуха через регуляторы. Если производительность вентиляторов, расходы воздуха через регуляторы отличаются от расчетной менее чем на 10%, а $\eta_{ст} > 0,6$, то найденный режим будет оптимальным, а суммарная потребляемая мощность на проветривание будет при этом минимальной.

Потребляемую каждым вентилятором мощность можно вычислить по формуле

$$N_i = \frac{H_i Q_i}{102 \eta_{в.т} \eta_{м.т}}$$

и сравнить вычисленную величину со значением до оптимизации.

При работе автоматических систем управления проветриванием нет необходимости в проведении полного факторного эксперимента и определении математической модели управления проветриванием. Зная $Q_{i,р}, q_{i,р}, R_{2i, \min}, H_e$ и применив последовательный симплексный метод, необходимо поддерживать режим проветривания, при котором $\Phi = 0$, варьируя входными параметрами системы с малым шагом.

При отсутствии такой системы на руднике можно, определив оптимальный режим в течение некоторого промежутка времени, при котором $R_{сет} \approx \text{const}$, корректировать режим с учетом естественной тяги. Для этого необходимо иметь зависимость

$h_0 = f(\theta)$, где f — температура наружного воздуха ($^{\circ}\text{C}$), и, имея зависимость $\theta_1 = f(h_0)$, $\theta_2 = f(h_0)$, $\alpha_1 = f(h_0)$, вводить коррекцию на естественную тягу.

Для шахт, оплещенных по газу, нельзя изменять входные параметры в таких широких пределах. В этих условиях можно слегка «покачивать» режим проветривания для определения направления движения к оптимуму.

Суть метода заключается в том, что искомое направление оценивается с помощью уравнения плоскости (локальной области), связывающего обобщенный критерий оптимизации с входными параметрами в окрестностях нулевой точки.

Проведя дробный факторный эксперимент и при этом варьируя входные параметры (углы установки направляющих аппаратов или лопаток рабучего колеса для осевых вентиляторов) в небольшом диапазоне, можно получить зависимость (9.132) для небольшого участка факторного пространства в линейном виде.

Коэффициенты перед факторами в линейном уравнении пропорциональны составляющим градиента обобщенного критерия оптимизации, а направление градиента даст самый быстрый путь к экстремуму (оптимуму).

На этом и основывается градиентный метод. Процедура движения по градиенту называется крутым восхождением. Чем точнее мы будем знать коэффициенты линейного уравнения $F = F_0 + \varphi_1(\theta_1) + \varphi_2(\theta_2)$, тем точнее найдем направление движения к оптимуму.

Программа поиска оптимума градиентным методом строится в следующем порядке.

Для получения линейной модели для рассматриваемого выше объекта реализуется дробная реплика эксперимента 2^2 . При построении дробных реплик используют следующее правило: для того чтобы сократить число опытов, нужно каждому фактору присвоить вектор-столбец матрицы, принадлежащий взаимодействию, которым можно пренебречь. Тогда значение нового фактора в условиях опытов определяется знаком этого столбца.

Рассмотрим это правило на примере. Пусть объект имеет два входных параметра. Полный факторный эксперимент для матрицы типа 2^2 приведен в табл. 9.3.

Будем варьировать факторами в небольших пределах и найдем линейную модель объекта. Это значит, что эффектом взаимодействия $\theta_1\theta_2$ можно пренебречь ($b_{12} = 0$), а этот вектор-столбец

Таблица 9.3

Номер опыта	θ_1	θ_2	θ_3	$\theta_4, \theta_5, \theta_6$	Номер опыта	θ_1	θ_2	θ_3	$\theta_4, \theta_5, \theta_6$
1	+1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	4	-1	+1	+1	+1

Примечание. Полный факторный эксперимент 2^2 .

можно использовать для нового фактора θ_2 . Эту программу проведения эксперимента можно использовать при поиске линейной модели объекта с тремя входными параметрами.

Дробные реплики находят широкое применение при получении линейных моделей. Целесообразность их применения возрастает с ростом числа факторов, так как при этом значительно сокращается число опытов. Так, например, при реализации полного факторного эксперимента 2^3 нужно провести 1024 опыта. Для получения линейной модели, применив дробную реплику, надо провести всего 16 опытов.

Процесс определения свободного члена и коэффициентов при неизвестных такой же, как и при проведении полного факторного эксперимента.

В конечном итоге мы нашли математическую модель режима проветривания шахты в небольшой области изменения входных параметров в виде линейного уравнения

$$F = b_0 + b_1\theta_1 + b_2\theta_2 + b_3\theta_3 \quad (9.138)$$

Если уравнение (9.138) адекватно, то направление градиента будет следующим:

$$\text{grad } F = \frac{\partial F}{\partial \theta_1} i + \frac{\partial F}{\partial \theta_2} j + \frac{\partial F}{\partial \theta_3} k \quad (9.139)$$

где i, j, k — единичные векторы в направлении координатных осей. Частными производными функции (9.138) будут коэффициенты b_1, b_2, b_3 . Выбирая шаг движения так, чтобы значения входных параметров $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ изменялись пропорционально b_1, b_2, b_3 с учетом знака, будем двигаться по кратчайшему пути к оптимуму.

Координаты проведения опытов по направлению градиента определяются путем перемножения соответствующих коэффициентов при неизвестных в уравнении (9.138) на шаг варьирования по данной оси.

Опыты следует прекращать, когда значение обобщенного критерия оптимизации в последующем опыте станет меньше, чем в предыдущем. Значения входных параметров, при которых критерий имеет максимальную величину, определяется оптимальный (или близкий к нему) режим проветривания шахты.

Теперь рассмотрим процесс поиска оптимальных режимов проветривания в условиях действующих систем оперативного управления. Наиболее приемлемым направлением в создании автоматических систем управления проветриванием рудников является применение управляющих вычислительных машин.

Вентиляционные сети рудников, как уже отмечалось выше, характеризуются сложностью, непостоянством в пространстве и времени аэродинамических параметров и топологии. Точка оптимальных режимов проветривания при этом непрерывно смещается. В процессе ведения горных работ изменяется количество

регуляторов расхода воздуха в сети, а также в количестве газовых вентиляционных установок.

Это обстоятельство вызывает затруднения в применении заданного факторного эксперимента или градиентного метода для поиска оптимальных режимов проветривания.

В условиях действующей системы оперативного или автоматического или автоматического контроля и управления проветриванием мы имеем дело с многопараметрической системой. При работе нескольких (два-три) вентиляторов в регуляторы расхода воздуха на крыльях и горющих часть здания параметры системы может достигать десяти и более.

При таком количестве входных параметров реализовать полный факторный эксперимент практически невозможно. Вместе с тем известно, что для этого надо провести 2^n опытов для изучения зависимости обобщенного критерия оптимизации от входных параметров. Если даже эта зависимость в будущем удастся, то исследовать ее на экстремум при таком количестве параметров весьма затруднительно.

При применении градиентного метода (исходный метод), но все же они возникают при изменении количества входных параметров. Поэтому при функционировании системы автоматического управления проветриванием для оптимального поддержания вентиляционного режима в точке оптимума целесообразно применить симплексный метод. Этот метод в наибольшей степени подходит к адаптационной оптимизации сложного объекта с помощью ЭВМ. Он позволяет производить контроль изменения режима проветривания с его оптимумом.

По этому методу опыты ставятся в вершинах $(n - 1)$ -мерного симплекса, где n — число входных параметров системы.

Симплекс — это множество $n - 1$ смежных точек, образующих выпуклую фигуру в n -мерном пространстве. Симплексный метод поиска оптимума совмещает процесс нахождения критерия оптимизации с движением по его градиенту.

При симплексном методе из любого $(n - 1)$ -мерного симплекса легко получить симплекс большей или меньшей размерности. Симплексы легко перечислять в пространстве — отобразив одну точку и используя оставшиеся грани, можно получить новый симплекс, добавив одну точку, которая является зеркальным отображением отброшенной.

Поставив опыты в вершинах исходного симплекса, находим значение критерия оптимизации в каждой вершине, затем отобразим вершину с наилучшим значением критерия, по правилу зеркального отображения строим новую вершину симплекса и в ней ставим опыт.

Затем процесс отображения вершины с минимальным значением критерия F и построение нового симплекса повторяется, в результате чего формируется цепочка симплексов, сходящаяся к оптимуму. Центр симплексов движется по некоторой

ломаной, близкой к градиенту, к области со все более и более высоким значением обобщенного критерия оптимизации. Достигнув области оптимума, симплекс начинает вращение вокруг вершины с максимальным значением критерия. Это явление может быть использовано для определения конца процесса оптимизации.

Из всех методов оптимизации симплекс-метод наиболее формализован. Все вычисления, связанные с движением к оптимуму, слежением за оптимумом, можно поручить ЭВМ.

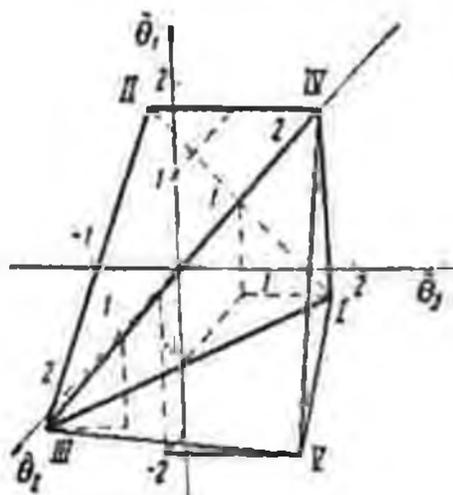


Рис. 9.15. Симплекс для $n = 3$

Кроме того, при применении этого метода легко изменить размерность симплекса, убрав или добавив одну или несколько вершин, что очень удобно, так как в процессе ведения горных работ могут добавиться или демонтироваться один или несколько регуляторов расхода воздуха.

Рассмотрим процесс оптимизации режима проветривания для вышеприведенной вентиляционной системы с тремя вентиляторами.

Для трех факторов симплексом будет тетраэдр. Исходный симплекс желательно расположить в факторном пространстве так, чтобы вершины его имели целочисленное значение и координатных координатах. Не для всех симплексов это возможно, но тетраэдр так расположить можно.

При применении симплекс-метода нет ограничений на выбор шага варьирования, так как мы не будем находить математическую модель, выражающую зависимость критерия оптимизации от входных параметров, но и выбирать их большими не следует, чтобы не проскочить точку оптимума. Симплекс для трех входных параметров приведен на рис. 9.15. Координаты вершин симплекса можно записать в виде матрицы

Для каждого опыта по формуле (9.131) вычисляем значение обобщенного критерия оптимизации, сравниваем их между собой и отбрасываем вершину симплекса с наименьшим значением критерия. По правилу зеркального отображения отброшенной находим координаты новой вершины симплекса по формуле

$$\theta_j^* = \frac{2}{n} \sum \bar{\theta}_j - \theta_j, \quad (9.140)$$

где θ_j^* — координата новой точки в натуральных координатах для входного параметра с номером $j = 1, 2, 3$;
 n — число входных параметров;
 θ_j — координата в натуральных значениях вершины сим-

плекса с хорошим значением критерия для входного параметра с номером j ;

θ_j — координата в натуральных значениях отброшенной вершины для плодного параметра с номером j .

Таким образом находим координаты новой вершины (θ_1^* , θ_2^* , θ_3^*), которая будет зеркальным отражением отброшенной.

Рассмотрим численный пример. Примем нулевой уровень для всех факторов равным 30° , шаг варьирования — 10° . Тогда верхний уровень варьирования фактора будет 40° ($+1$), а нижний 20° (-1). Исходный симплекс для $n = 3$ в натуральных значениях факторов будет иметь вид, приведенный в табл. 9.4

Таблица 9.4

Номер опыта	θ_1 , градус	θ_2 , градус	θ_3 , градус	Обобщенный критерий оптимизации
1	20	20	40	F_1
2	40	20	20	F_2
3	20	40	20	F_3
4	40	20	40	F_4

Допустим, что критерий F , вычисленный по формуле (9.131), имеет для этих опытов значения: $F_2 < F_1 < F_3 < F_4$. Вершина симплекса под номером II имеет минимальное значение критерия. Ее надо отбросить и по формуле (9.140) найти координаты зеркального отражения.

Координаты новой вершины будут:

по оси θ_1 :

$$\theta_1^* = \frac{2}{3}(20 + 20 + 40) - 40 \approx 13^\circ;$$

по оси θ_2 :

$$\theta_2^* = \frac{2}{3}(20 + 40 + 20) - 20 \approx 33^\circ;$$

по оси θ_3 :

$$\theta_3^* = \frac{2}{3}(40 + 20 + 40) - 20 \approx 46^\circ.$$

Используя формулу перехода (9.125), находим координаты новой вершины в кодированных величинах.

$$\theta_1^* = -1.7; \quad \theta_2^* = 0.3; \quad \theta_3^* = 1.6.$$

Для наглядности на рис. 9.15 построим эту вершину (V) и получим новый симплекс с вершинами (I, III, IV, V).

Проводим опыт в точке V, находим F_5 и теперь сравниваем между собой значения обобщенного критерия оптимизации F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 . Отбрасываем вершину во втором симплексе с минимальным значением F , находим координаты ее зеркального отражения и так далее — процесс повторяется снова до тех пор, пока одна из вершин симплекса не встретится с $n - 1$ симплексов.

Координаты вершин, вокруг которой симплекс начал вращаться, и будут оптимальным режимом проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов Ф. А., Бойко В. А.** Автоматизация проектирования шахт. Киев, «Научная мысль», 1967, с. 310.
2. **Абрамов Ф. А., Бойко В. А., Кременчуцкий И. Ф.** Метод проверки вентилятора на эффективность совместной работы — «Уголь Украины», 1975, № 9, с. 42—44.
3. **Абрамов Ф. А.** Рудничная аэродинамика. М., «Недра», 1972, 272 с.
4. **Абрамов Ф. А., Ган Р. Б., Потемкин В. Я.** Воздухораспределение в вентиляционных сетях шахт. Киев, «Научная мысль», 1971, 135 с.
5. **Абрамов Ф. А., Кременчуцкий И. Ф.** Расчет аэродинамического сопротивления вентиляционных сетей в главных вентиляционных сетях. «Изв. вузов. Горный журнал», 1974, № 2, с. 48—51.
6. **Асташин А. С.** Линейное программирование в горном деле. М., «Недра», 1966, 144 с.
7. **Аналитический метод определения места заложения вентиляционной скважины.** Разработка месторождений полезных ископаемых, том 14. Киев, 1978, с. 3. В. А. Ган, Ф. А. Абрамов, И. Ф. Кременчуцкий, И. А. Фролов и др.
8. **Бурчица А. С., Мухомов Н. И., Ушаков К. Э.** Рудничная аэриология. М., «Недра», 1971, 373 с.
9. **Бурчица А. И.** Основы теории управления шахтными вентиляционными сетями. 1974, с. 22 (ИГД им. А. А. Скочинского).
10. **Бойко В. А.** Рудничная вентиляция. М., «Недра», 1967, 319 с.
11. **Бойко В. А., Кременчуцкий И. Ф.** Определение аэродинамического сопротивления регулятора на выемочном участке. Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 39. Киев, «Геоиздат», 1975, с. 3—6.
12. **Ворошич Н. И.** Основы рудничной аэродинамики. М., Углетехиздат, 1961, 491 с.
13. **Выбор оптимального места заложения вентиляционной скважины на выемочном участке при неравномерном поступлении сосредоточенных количеств воздуха.** «Изв. вузов. Горный журнал», 1967, № 9, с. 52—56. Авт.: Ф. А. Абрамов, И. Ф. Кременчуцкий, И. А. Фролов и др.
14. **Ворошич Н. И., Бурчица А. И., Пилипчик В. С.** Расчет рудничной вентиляции. М., Углетехиздат, 1962, 467 с.
15. **Временное руководство по проектированию и организации проектирования угольных шахт восточных бассейнов страны.** Кемерово, 1969, 411 с.
16. **Автоматизация шахтных вентиляторных установок.** М., «Недра», 1976, 320 с.
17. **Адыр Ю. П.** Введение в планирование засперфачива. М., «Наука», 1969, 157 с.
18. **Бойко В. А., Петрович А. А., Хомашурский В. Г.** Взаимосвязанность расхода воздуха параллельными горными выработками при регулировании воздухо-распределения. Известия вузов Горный журнал, № 11, 1974, с. 63—70.
19. **Бойко В. А., Петрович А. А., Хомашурский В. Г.** Оптимальное управление воздухопродультивити при регулировании проектирования шахт. Известия вузов Горный журнал, № 10, 1974, с. 67—74.
20. **Комаров В. Б., Борщев Л. Ф.** Рудничная вентиляция. ГОИТИ СССР, 1938, 483 с.
21. **Кремлевский А. И.** Сборник задач по рудничной вентиляции. М., Углетехиздат, 1964, 318 с.
22. **Лурьяков А. М., Розенштейн Б. А., Ушаков М. И.** Научные основы проектирования угольных шахт для разработки сложных пластов. М., «Недра», 1964, 448 с.

23. Калугин Н. Г., Кош С. С. Основы проектирования угольных шланг. М., Недра, 1964. 267 с.
24. Князев А. П. К решению задачи о выборе а priori выработок. Уголь, 1965, № 4, с. 26—28.
25. Кременчуцкий Н. Ф. Определение наилучшего расстояния между промежуточными выработками с учетом расходов на проветривание. Известия ДГН. Том XXXI. М., Углетехиздат, 1968, с. 69—71.
26. Кременчуцкий Н. Ф. Отклик на статью «За увеличение поперечных сечений шахтных выработок». — «Безопасность труда в промышленности», 1968, № 11, с. 18.
27. Кременчуцкий Н. Ф. Оптимальная длина вентиляционного поля с учетом вентиляции. Шах. вухов. Горный журнал, 1959, № 9, с. 29—46.
28. Ермустицкий Н. В. Симплексный метод оптимизации. М., 1966, с. 29—60. (Труды МЭИ, вып. 67)
29. Кременчуцкий Н. Ф. Определение наилучшего сечения горных выработок, входящих в разветвленную сеть. М., 1960, с. 91—96. (Казахстанский политехнический институт Труды Вып. IV)
30. Кременчуцкий Н. Ф. Выбор экономически выгодного диаметра трубопровода для проветривания забоя штрека при сплошной системе разработки. М., 1960, с. 97—102. (Казахстанский политехнический институт Труды, Вып. IV)
31. Кременчуцкий Н. Ф. Способ определения оптимального количества вдува. Шах. вухов. Горный журнал, 1961, № 3, с. 79—82.
32. Кременчуцкий Н. Ф. Аналитическое определение параметров при единичной и совместной работе вентиляторов частичного проветривания на трубопроводе. Шах. вухов. Горный журнал, 1961, № 7, с. 64—68.
33. Кременчуцкий Н. Ф. Проветривание угольными шланг. Гекториздат, 1961. 240 с.
34. Кременчуцкий Н. Ф. Методика подсчета экономической эффективности дегазации шланг. Вопросы теории дегазации угольных пластов. Труды Всесоюзного научно-технического совещания по теории дегазации. М., 1963, с. 193—194.
35. Местер Н. М., Захаров Н. Н. Автоматизация контроля и регулирования руднично-приветривания. М., Недра, 1974. 237 с.
36. Кременчуцкий Н. Ф., Яремаш Н. Ф. Определение наилучшего диаметра испорчено парциального трубопровода частично проветривания. Разработка месторождений полезными ископаемыми. Вып. IV. Киев, 1963, с. 8—17.
37. Кременчуцкий Н. Ф. Расчет системы дилатационно-сжимающих выработок. Совершенствование проветривания шланг. 1967, с. 117—122. (Дисперсионный филиал института металлов АН СССР Труды Вып. II)
38. Шимков В. В. Теория эксперимента. М., Недра, 1971. 207 с.
39. Кременчуцкий Н. Ф. Аналитическое определение места забоя в вентиляционной системе. Шах. вухов. Горный журнал, 1970, № 11, с. 68—74.
40. Шумин Л. А. Аэродинамические системы сокращенного управления вентиляцией высокопроизводительных шахтных шланг. Док. на конкурс ученой степени докт. техн. наук (Москва). М., 1973.
41. Растрелин А. А. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем. Рига, с/издатель, 1965. 142 с.
42. Фейсман В. В. Теория оптимального эксперимента. М., Недра, 1971. 312 с.
43. Бадришвили А. Л., Албалин Ф. С. Теоретические вопросы автоматизации проветривания угольных шланг. М., Недра, 1975. 136 с.
44. Кременчуцкий Н. Ф., Кашура Н. М., Мельников А. А. Определение максимального вентиляционного давления трубопровода методом проветривания. Шах. вухов. Горный журнал, 1972, № 3, с. 63—64.
45. Кременчуцкий Н. Ф. Расчет вентиляционных систем с предварительным управлением завоздушивания проветривания. Совершенствование проветривания шланг (тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания), 1972, с. 8—9.
46. Кременчуцкий Н. Ф., Кашура Н. М. Нейтральные аналитические исследования вентиляционных систем при объединении шланг. Совершенствование проветривания.

- ылая шахт (Тезисы доклада Всесоюзного научно-технического совещания) 1972, с. 51—52
47. Кременчуцкий Н. Ф., Нишин В. М. Определение оптимальных сетей сети горной выработки шахты «Гитль Угаринна», 1972, № 11, с. 37—38
 48. Кременчуцкий Н. Ф. Расчет распределения воздуха при работе на вентиляционной сети шахт в более совершенной. Разработка месторождений полезных ископаемых Т. 31, Киев, 1972, с. 59—63
 49. Кременчуцкий Н. Ф., Аполдик Н. М. Выбор места расположения соединительной выработки при объединении вентиляционных систем. Изв. вузов Горный журнал, 1973, № 1, с. 56—61
 50. Кременчуцкий Н. Ф., Аполдик Н. М., Фёдоров Т. С. Определение места заложения скважины, подкачки в шахту свежий воздух. Изв. вузов Горный журнал, 1973, № 7, с. 42—48.
 51. Зайдл J. Z. Методы поиска экстремума. М., «Наука», 1967.
 52. Кременчуцкий Н. Ф. Расчет и преобразование диагональных соединительных методов расщепления выработок. «Изв. вузов, Горный журнал», 1974, № 9, с. 51—57.
 53. Кременчуцкий Н. Ф. Методы расчета и преобразования сложных диагональных соединительных выработок. «Изв. вузов, Горный журнал», 1974, № 12, с. 56—62.
 54. Кременчуцкий Н. Ф., Аполдик Н. М. Аналитическое определение места заложения соединительной выработки при объединении шахт. Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. № Киев, «Техника», 1974, с. 119—125
 55. Кременчуцкий Н. Ф., Фёдоров Т. С. Определение места заложения воздуховыводящей скважины при помощи методов линейного программирования. Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 36. Киев, «Техника», 1974, с. 125—134.
 56. Кременчуцкий Н. Ф. Расчет соединительных выработок. «Изв. вузов, Горный журнал», 1975, № 12, с. 64—67.
 57. Цой С., Радлиц Г. А. Принципы минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями. Алма-Ата, «Наука», 1968. 258 с.
 58. Лыжович С. М. Основы проектирования угольных шахт. М., «Недра», 1967. 224 с.
 59. Мосолов П. И. Задания по рудничной вентиляции. ЛПИ, 1968. 67 с.
 60. Масляев П. И. Рудничная вентиляция. М., «Недра», 1970. 215 с.
 61. Масляев А. А., Патрицын М. А. Основы проектирования вентиляции угольных шахт. М., «Недра», 1971. 231 с.
 62. Масляев А. Ф., Яровой И. М., Бойко В. А. Рудничная и промышленная вентиляция. М., «Недра», 1972. 246 с.
 63. Митрофан Б. И., Кременчуцкий Н. Ф., Скрылник А. И. Исследование воздушной завесы как средства борьбы с утечками воздуха через надшахтные здания стволы. «Изв. вузов Горный журнал», 1965, № 6, с. 64—66
 64. Митрофан Б. И., Патрицын М. А. Проветривание нагнетимых и нагнетно-содержимых рудников. М., Гостортехиздат, 1963. 169 с.
 65. Митрофанов Б. И. Методы расчета расхода электроэнергии при автоматизации управления распределением воздуха в шахтах. Совершенствование проветривания шахт. Вып. 11, 1971, с. 145—152. Авт. Н. Ф. Кременчуцкий, И. А. Фролов, Н. В. Шибка и др.
 66. Определение оптимального места заложения вентиляционной скважины в разветвленной вентиляционной сети. «Изв. вузов, Горный журнал», 1967, № 7, с. 59—63. Авт. Ф. А. Абрамов, Н. Ф. Кременчуцкий, И. А. Фролов и др.
 67. Определение оптимального места заложения вентиляционной скважины при комплексном учете затрат. Техника безопасности, охраны труда и горноспасательное дело ЦНИИТЭИУголь, 1968, № 5, с. 25—29. Авт. Ф. А. Абрамов, Н. Ф. Кременчуцкий, И. А. Фролов и др.
 68. Пова Н. Ф. Техническая гидромеханика. М., «Машиностроение», 1969. 524 с.
 69. Проектирование и комплексная оптимизация параметров шахт. Под общей редакцией проф. А. С. Бурчакова. М., «Недра», 1972. 368 с.

70. Рогов Е. Н., Цой С. К вопросу теории расчета вентиляционных сетей. *Авиапутев.*, Горный журнал, № 3, с. 69—73.
71. Серебрянский А. А., Комаров В. В., Рудничная вентиляция шахт. Углетехиздат, 1969, 833 с.
72. Современный методы проектирования шахт с помощью компьютерных систем. М., 1967, 77 с. Автор Ф. А. Мрамор, И. А. Фришман, И. В. Шибанов и др.
73. Справочник по рудничной вентиляции. Под редакцией проф. А. И. Косов-Фоминина. М., Гостехиздат, 1962, 491 с.
74. Современная работа шахтных вентиляторов. М., Гостехиздат, 1961, 104 с. Автор А. А. Цандлер, Н. И. Михайловичев, В. А. Курманов и др.
75. Современный методы проектирования угольных шахт. Метод. 1968, 267 с. Автор И. А. Завитов, К. К. Кузнецов, В. Г. Шибанов и др.
76. Ушаков А. З. Вентиляция подземных выработок при их эксплуатации. 1967, 156 с. (МГИИ).
77. Ушаков А. З. Автоматизация вентиляционных систем в шахтах выработки. М., «Недра», 1973, 168 с.
78. Яковлев Л. Теория и практика обработки результатов измерений. М., «Мир», 1968, 183 с.
79. Федоров А. М. О выборе параметров вентилятора при эксплуатации вентилятора частного пространства. *Шахтные строительств.*, 1961, № 12, с. 7—10.
80. Цой С., Рогов Е. Н. Основы теории вентиляционных сетей. *Авиапутев.*, «Шахты», 1965, 281 с.
81. Яковлев Л. Ф., Серебрянский В. И., Кривонозов И. Ф. Оптимальные скорости движения воздуха в клапанных выработках уголей Украины. 1965, № 11, с. 45—46.
82. Рядовиченко по проектированию вентиляции угольных шахт. М., «Недра», 1975, 228 с.
83. Инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для структурного и действующим угольным шахт. М., «Недра», 1975, 79 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА	3
1.1. Учет расхода электроэнергии при регулировании распределения воздуха	5
1.2. Определение оптимальных сечений горных выработок вентиляционной сети с регулируемым распределением воздуха	7
1.3. Учет затрат на вентиляцию при определении оптимальных размеров выемочных полей	12
1.4. Совместное определение оптимальных размеров выемочных полей и оптимальных сечений горных выработок	14
1.6. Определение величины уменьшения расхода электроэнергии на вентиляцию при десатурации шахт и автоматизации вентиляционных сетей шахт	20
2. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ	24
2.1. Расчет расхода воздуха для проветривания шахт по газовому фактору	24
2.2. Проверка эффективности совместной работы вентиляторов	27
2.3. Регулирование распределения воздуха в пределах выемочного участка путем уменьшения сопротивления выработок	29
2.4. Расчет параметров регулирования распределения воздуха в сложных вентиляционных сетях	31
2.6. Определение целесообразности выработок для расширения, перепланировки или облицовки	35
2.6. Примеры расчета	37
3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СВАЖИНЫ	44
3.1. Определение оптимальных диаметра и числа параллельных свалов	44
3.2. Определение оптимального места заложения свалами на линии среднегодовой дисретной величины воздуха	45
3.3. Выбор оптимального места заложения вентиляционной свалом на выработке с произвольным количеством дисретных величин воздуха	46
3.4. Определение оптимального места заложения вентиляционной свалом при произвольном учете затрат	49
3.6. Графический способ определения оптимального места заложения воздуха выходящей свалом	51
3.6. Аналитический способ определения оптимального места заложения воздуха выходящей свалом	55
3.7. Определение места заложения воздухоподводящей свалом с применением метода наименьших приращиваний	62
3.8. Определение оптимальных значений места заложения воздухоподводящей свалом с применением метода наименьших приращиваний	65
3.9. Аналитический способ определения оптимального места заложения воздухоподводящей свалом	66

3.10. Определение места заложения воздуховодовых скважин с применением методов лэйбелного программирования	73
3.11. Определение оптимальных значений места заложения воздуховодовых скважин, расхода воздуха по скважине и производительности вентилятора	74
3.12. Примеры расчета	76
4. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ УПРОЩЕНИЕМ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯМИ	87
4.1. Общие положения	87
4.2. Расчет распределения воздуха по выработкам шахты, проветриваемой одним вентилятором	88
4.3. Расчет распределения воздуха по выработкам шахты с двумя и более вентиляторами	96
4.4. Определение расхода воздуха по новой выработке в вентиляционной системе	99
4.5. Расчет регулирования распределения воздуха на отдельных участках	101
4.6. Применение метода для расчета аварийных режимов вентиляции	107
4.7. Примеры расчета	113
5. РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ НЕКОТОРЫХ СЛУЧАЯХ ОБЪЕДИНЕНИЯ ШАХТ	118
5.1. Расчет распределения воздуха в объединенной вентиляционной системе	118
5.2. Расчет гидравлического сопротивления регулятора	120
5.3. Расчет места заложения скважины для выработки	131
5.4. Определение места заложения скважины для выработки с применением метода лэйбелного программирования	123
5.5. Определение оптимальных значений места заложения скважины для выработки, расхода воздуха по ней и производительности вентилятора	126
6. РАСЧЕТ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ВЫРАБОТОК	128
6.1. Расчет распределения воздуха в простом диагональном соединении	128
6.2. Расчет и преобразование диагональных в ряды комбинированных соединений методом «среднего» выработка	131
6.3. Расчет и преобразование сложных диагональных соединений методом «интегрального среднего» выработка	143
6.4. Расчет сложных диагональных соединений выработок методом последовательных преобразований	147
6.5. Расчет многоветвистых вентиляционных систем путем преобразования на несложные вентиляционные системы	151
6.6. Расчет распределения воздуха в соединенных выработках методом фиктивного общего расхода воздуха	154
6.7. Примеры расчета	157
7. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ	160
7.1. Определение параметров местного проветривания при заданных вентиляторах и трубопроводах	160
7.2. Уточненный расчет параметров местного проветривания при металлических трубопроводах	172
	179

7.3. Расчет вентиляционных систем при рассредоточенной установке вентиляторов местного проветривания	173
7.4. Определение оптимального диаметра трубопровода местного проветривания	184
8. РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ РАСХОДА ВОЗДУХА В ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ	
8.1. Общие требования к регуляторам расхода воздуха	190
8.2. Краткие сведения о возможных конструкциях регуляторов расхода воздуха на участке	190
8.3. Аэродинамические параметры некоторых типов регулирующих органов регулятора расхода воздуха	193
8.4. Аналитическое описание характеристик регулирующего органа линейного изменения расхода воздуха	197
8.5. Приближенное аналитическое описание характеристик регулирующего органа с нелинейным законом изменения расхода воздуха	208
8.6. Применение воздушной завесы для уменьшения внешнего утечка воздуха	217
9. ОСНОВЫ РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ДИСПЕТЧЕРСКОМ И АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ	
9.1. Общие сведения	223
9.2. Математическое описание изменения расхода воздуха в сложных вентиляционных соединениях при отрицательном регулировании	226
9.3. Расчет взаимосвязности расходов воздуха в параллельных горных выработках при отрицательном регулировании воздухо-распределения	242
9.4. Математическое обеспечение оптимального управления воздухо-распределением при регулировании проветривания шахт	249
9.5. Математическое обеспечение расчетов вентиляционными сетями шахт и рудников в системе диспетчерского и автоматического управления проветриванием	257
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	274

ИБ № 2531

**Владимир Александрович Бойко
Николай Феофанович Кременчуцкий
ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАСЧЕТА
ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ**

Редактор издательства *И. Ковалева*
Переводчик *Г. Сидорова* Художественный редактор *О. Зайцев*
Технический редактор *Л. Гаврилов* Корректор *М. Куркина*

Сдана в набор 6/VIII 1977 г. Подписано в печать 4/XI 1977 г. Т 13146
Формат 66x90/16. Бумага № 2 Печ. л. 17,6 Уч.-изд. л. 17,63
Тираж 2 100 экз. Заказ № 4-1/5719-10. Цена 2 р. 90 к.

Издательство «Идра», 103623, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 6 Социалполиграфпринта при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, С-146, ул. Менделеева, 10